H. JANES, K. MAASIK, E. PUUSEPP, A. VOLDEK

ELEKTRIMASINAD

A-23933

H. JÄNES · P. KAASIK · E. PUUSEPP · A. VOLDEK

ELEKTRIMASINAD

Eesti NSV Ministrite Nõukogu Riikliku Kõrgema ja Kesk-erihariduse Komitee poolt kinnitatud õppevahendiks Eesti NSV kesk-eriõppeasutuste elektrotehniliste erialade õpilastele

24. jaan. 62.

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1961

6T2,1
E52

Raamatus käsitletakse elektrimasinate tööpõhimõtteid, ehitust ja omadusi. Küsimusi vaadeldakse peamiselt nende füüsikalisest sisust lähtudes. Matemaatiline käsitlus ei ulatu väljapoole tehnikumide õppeprogramme.

Raamat on mõeldud tehnikumide ja kõrgemate koolide elektrotehniliste erialade õpilastele ning samuti inseneridele ja tehnikutele nende teadmiste täiendamisel elektrimasinate alal.

Retsenseerinud prof. H. Võrk ja ins. F. Oorn.

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

EESSÕNA

Nõukogude Liidu rahvamajandus areneb väga kiiretempoliselt. Vastavalt NLKP XXI kongressi otsustele lõpetatakse aastail 1959... 1965 kogu maa põhiline elektrifitseerimine. Elektrienergia toodang Nõukogude Liidus kasvab selle aja jooksul rohkem kui kaks korda, Eesti NSV-s aga umbes 6 korda.

Tänapäeval toodetakse kogu elektrienergia elektrigeneraatorite abil. Elektrimootorid tarbivad ligikaudu 60% kogu toodetud elektrienergiast. Seega on elektrimasinate osatähtsus rahvamajanduses küllaltki suur. Tänapäeval puutuvad elektrimasinatega kokku väga laiad töötajate hulgad.

Eesti NSV-s pole rea viimaste aastate jooksul kirjastatud raamatuid elekrimasinate alal. Seepärast püüdsidki käesoleva raamatu autorid kohandada teost võimalikult laiema lugejaskonna jaoks.

Raamatus puudutatud küsimusi vaadeldakse esmajärjekorras füüsikalise olemuse selgitamise seisukohast. Raamatus kasutatud matemaatiline aparaat vastab tehnikumide õppeprogrammidele. Teose ulatus rahuldab täielikult tehnikumide elektrimasinate eriala programmi. Tehnikumide teiste elektrotehniliste erialade jaoks on teose ulatus veidi suurem õppeprogrammi nõuetest. Materjal, mis ületab teiste erialade programmide nõudeid, on trükitud ptiikirjas.

Raamatu põhiline osa on jõukohane lugejatele, kes omavad keskharidust.

Raamatu sissejuhatav osa on mõeldud esmajoones lugejatele, kes ei oma ettevalmistust elektrotehnika alustes. Teistele lugejatele võib see osa olla kasulik elektrotehnika aluste kordamise mõttes.

Teost võivad edukalt kasutada ka kõrgemate koolide elektrotehniliste erialade üliõpilased elektrimasinates toimuvate füüsikaliste protsesside ja nähtuste tundmaõppimisel.

Raamatu autorid on püüdnud esitada materjali kaasaegse teaduse ja tehnika tasemel.

Viimastel aastatel on arenenud tugevasti sünkroonmasinate teooria, eriti nende kasutamise osas võimsates energiasüsteemides.

Neid küsimusi on seni käsitletud ainult tehnilistes ajakirjades ja monograafiates. Seejuures kasutatakse sageli nii keerukat matemaatilist aparaati, et materjali omandamine on raske isegi hästi ettevalmistatud inseneridele. Kuna need küsimused omavad energiasüsteemides tänapäeval suurt tähtsust, siis pidasid autorid vajalikuks esitada seda materjali ka käesolevas raamatus. Mainitud küsimusi käsitletakse lihtsal kujul, kusjuures tuuakse esile ainult nähtuste füüsikaline sisu.

Raamatu lõpus on esitatud kirjanduse loetelu neile, kes soovivad täiendada oma teadmisi elekrimasinate teooria, arvutuse, projekteerimise, katsetamise ja kasutamise alal.

Raamatu üksikud osad on kirjutatud järgmiste autorite poolt: sissejuhatav osa — tehn. tead. kand. *H. Jänes*;
alalisvoolumasinad ja transformaatorid — ins. *E. Puusepp*;
vahelduvvoolumasinate teooria üldküsimused ja asünkroonmasinad — tehn. tead. kand. *P. Kaasik* ja tehn. tead. dr. *A. Voldek*;
sünkroonmasinad ja vahelduvvoolu-kommutaatormasinad — tehn. tead. dr. *A. Voldek*.

Autorite kollektiivi tööd juhtis tehn. tead. dr. *A. Voldek*.

Autorid avaldavad tänu prof. H. Võrgule ja ins. F. Oornile kasulike märkuste eest.

SISSEJUHATUS

Elektrimasinate õppimisel on vaja tunda elektrotehnika aluseid ja elektrimaterjale. Käesoleva raamatu sissejuhatuses käsitletakse elektrimasinate seisukohalt vajalikke elektromagnetilise välja ning elektri- ja magnetahelate põhiküsimusi ja peatutakse lühidalt elekrimasinaehituses kasutatavatel materjalidel.

0-1. ELEKTROMAGNETILINE VÄLI

Iga keha koosneb aine elementaarosakestest, millest enamik omab kas negatiivset (näiteks elektron) või positiivset (näiteks prooton) elektrilaengut. Laetud elementaarosake on ümbritsetud oma elektromagnetilisest väljast. Kui kehal on positiivseid ja negatiivseid elementaarosakesi võrdselt ja kehas ei esine elementaarosakeste kindlasuunalist liikumist, siis elementaarosakeste elektromagnetiline väli ei ulatu väljapoole aatomi piire ja seega jääb väli väljaspool keha märkamatuks. Seevastu keha, milles on ülekaalus kas positiivsed või negatiivsed elementaarosakesed, põhjustab välises ruumis elektrivälja. Niisugust keha nimetatakse laetud kehaks ja tema laengu suuruse iseloomustamiseks kasutatakse ühikut *kulon* (C).

Kaks elementaarosakest või keha, millest ühel on positiivne ja teisel negatiivne laeng, avaldavad teineteisele tõmbejõudu. Samanimelised laengud seevastu tõukavad teineteist.

Käesolevas raamatus kasutatakse füüsikaliste suuruste ühikutena nn. MKSA süsteemi ühikuid. Selle süsteemi põhiühikuteks on pikkusühik meeter — m, massiühik kilogramm — kg, ajaühik sekund — sec ja elektrivoolu ühik amper — A. Teised MKSA süsteemi ühikud on nendest põhiühikutest tuletatud. Laengu ühik 1 C on näiteks võrdne 1 Asec.

Kui kehas või keskkonnas esineb laetud elementaarosakeste või ioonide kindlasuunaline liikumine, mida nimetatakse elektrivooluks, siis põhjustab see juhet ümbritsevas ruumis ja keha või keskkonna sisemuses magnetvälja. Magnetväli on elektrivoolu põhiline kaasnähtus. Elektrivoolu ühik on *amper* (A). Harilikult

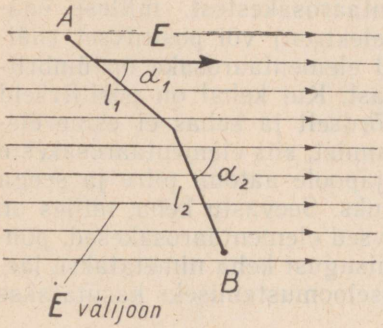
esinevad elektri- ja magnetväli üheaegselt ning on elektromagnetilise välja kaks eri, kuid teineteisega seotud külge.

Elektri- ja magnetvälja iseloomustamiseks kasutatakse vektoriaalseid suurusi, sest peale füüsikalise suuruse intensiivsuse on vaja näidata ka suunda. Elektri- ja magnetväli on seega vektorväljad. Ruumis välja mõjusuuna näitamiseks kasutatakse vektorijooni ehk välijooni. Välijoonele on vektor igas punktis puutujaks. Välijoone suunaks loeme vektori suunda.

Peale vektorite liitmise ja lahutamise on vaja vektorit korrutada ja jagada skalaariga, samuti vajame vektorite nn. skalaarkorrutist. Vektori ja skalaari korrutis (jagatis) on korrutatava (jagatava) vektori suunaga vektor, mille absoluutväärtus ehk moodul on korrutatava (jagatava) vektori mooduli ja skalaari korrutis (jagatis). Kahe vektori skalaarkorrutis võrdub nende vektorite moodulite ja nende vektorite vahelise nurga koosinuse korrutisega:

$$\mathbf{AB} = AB \cos \widehat{\mathbf{AB}}.$$

Vektorid on raamatus trükitud rasvaselt, nende moodulid ja skalaarid aga kursiivis.



Joon. 0-1. Joonintegraali mõiste selgitamiseks

Vektorvälja iseloomustamiseks mingi teekonna ulatusel kasutatakse vektori joonintegraali mööda seda teekonda. Vektori **E** joonintegraal punktist *A* mööda teekonda *l* punkti *B*, s. o.

$$\int_{AlB} \mathbf{E}\mathrm{d}\mathbf{l},$$

võrdub teekonna kõikide lõpmatult väikeste pikkuselementide d**l** ja vektori **E** skalaarkorrutiste **E**d**l** summaga selle teekonna kohta. Kui väli on homogeenne, s. t. välja kõiki punkte iseloomustavad vektorid on võrdsed, ja teekond koosneb sirglõikudest nagu joonisel 0-1, siis on joonintegraal arvutatav lõpliku arvu skalaarkorrutiste summana:

$$\int_{AlB} \mathbf{E}\mathrm{d}\mathbf{l} = El_1 \cos \alpha_1 + El_2 \cos \alpha_2.$$

Elektrivälja iseloomustamiseks antud punktis kasutatakse elektrivälja tugevuse vektorit. Antud punkti elektrivälja tugevus (vektor) võrdub antud punktis positiivsele proovilaengule mõjuva mehaanilise jõuga proovilaengu ühe ühiku kohta, s. o.

$$E = \frac{F}{q_0},$$

kus **F** — mehaaniline jõud,

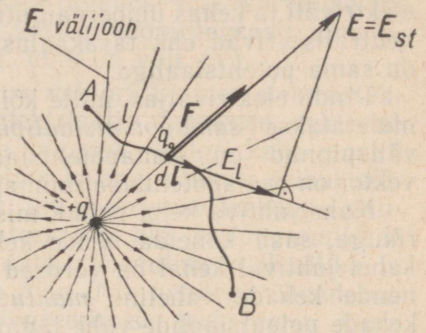
q_0 — proovilaengu suurus.

MKSA ühikute süsteemi puhul on jõu ühikuks *njuuton* (N). Jõud 1 N annab massile 1 kg kiirenduse 1 m/sec^2 ja 1 m pikkusel teel sooritab töö 1 *džaul* (J). Seega

$$1\,\text{J} = 1\,\text{N} \cdot 1\,\text{m}.$$

Järelikult saab elektrivälja tugevust väljendada MKSA süsteemis ühikuga 1 džaul meetri ja kuloni kohta (1 J/C m).

Positiivse punktlaengu väljas on elektrivälja tugevuse suund laengust eemale ja välijooned on laengu kohast lähtuvad kiired (joon. 0-2).



Joon. 0-2. Punktlaengu väli

Laengu q_0 paigutamisel elektriväljas punktist A mööda teekonda l punkti B (joon. 0-2) sooritab elektrivälja jõud **F** töö

$$A = \int_{AlB} \mathbf{F}\,d\mathbf{l} = q_0 \int_{AlB} \mathbf{E}\,d\mathbf{l} \quad \text{J}.$$

Paigalseisvate laengute elektriväljas ehk nn. elektrostaatilises väljas ei sõltu elektrivälja jõudude töö laengu ümberpaigutamisel ühest punktist teise teekonna kujust, vaid ainult teekonna alg- ja lõpp-punktide asendist. Tööd, mida elektrivälja jõud teevad laengu ümberpaigutamisel punktist A punkti B selle laengu ühe ühiku kohta, nimetatakse nende punktide *potentsiaalide vaheks*. Kui tähistades potentsiaali tähega U, siis

$$U_A - U_B = \frac{\int_{AB} \mathbf{F}\,d\mathbf{l}}{q_0} = \int_A^B \mathbf{E}\,d\mathbf{l} \quad \frac{\text{J}}{\text{C}}.$$

Potentsiaalide vahe ühikuks on J/C, mida nimetatakse *volt* (V). Kui omistada elektrivälja teatud punktile, näiteks punktile B potentsiaal $U_B = 0$, siis punkti A potentsiaal

$$U_A = \int_A^B \mathbf{E}\,d\mathbf{l}.$$

Potentsiaal 1 V on niisuguse punkti potentsiaal, kust laengu 1 C viimisel punkti, mille potentsiaal on 0, elektrivälja jõud teevad töö 1 J.

Kuna $\frac{1\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{C}} = 1$ V, siis elektrivälja tugevuse ühik on MKSA süsteemis *volt jagatud meetriga* (V/m).

Elektrostaatiline väli saab püsida kestvalt ainult niisuguses keskkonnas, milles ei toimu välja mõjul aine laetud osakeste liikumist ühe aatomi piiridest teise, vaid toimub ainult elementaarosakeste mõningane nihkumine. Ainet, milles elektrostaatiline väli saab kestvalt püsida, nimetatakse *dielektrikuks* ja elektrostaatilise välja toimel dielektrikus toimuvat nihkeprotsessi *polarisatsiooniks*.

Aineid, milles on elektrivälja mõjul ühe aatomi piiridest teise liikuvaid nn. vabu laenguid, nimetatakse *elektrijuhtideks*. Juhist keha asetamisel elektrostaatilisse välja toimub selles laengute liikumine kuni niisuguse laengute paigutuseni, mille juures väline elektriväli ja kehas ümberpaigutunud laengute elektriväli teineteise neutraliseerivad ehk tasakaalustavad. Juhtiva keha kõik punktid on sama potentsiaaliga.

Pinda elektriväljas, mille kõik punktid on sama potentsiaaliga, nimetatakse *samapotentsiaalipinnaks*. Juhtivate laetud kehade välispinnad on samapotentsiaalipinnad. Elektrivälja tugevuse vektor on samapotentsiaalipinnaga risti.

Kahe juhtiva keha puhul, mis on teineteisest eraldatud dielektrikuga, saab kõnelda nende kehade vahelisest mahtuvusest. Kui kahel juhtival kehal on võrdsed ja vastasmärgilised laengud, siis nende kehade vaheline *mahtuvus* võrdub ühe keha laengu ja kehade potentsiaalide vahe jagatisega:

$$C = \frac{q}{U}\ \mathrm{F}.$$

Mahtuvuse ühikuks on *farad* (F). 1 F on kehade niisugune mahtuvus, mille juures kehade 1-V potentsiaalide vahe puhul kehade laengud võrduvad 1 C.

Süsteemi kahest teineteisest dielektrikuga eraldatud juhtivast kehast, mis on valmistatud nende mahtuvuse kasutamiseks, nimetatakse *kondensaatoriks*.

Tasapinnalise kondensaatori mahtuvus avaldub valemiga

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{s}{b},$$

kus ε_r — suhteline dielektriline läbitavus,

$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}$ — elektriline konstant F/m,

s — ühe plaadi pindala m^2,

b — dielektriku paksus m.

Suhteline suurus ε_r näitab, mitu korda antud dielektriku puhul

on mahtuvus suurem, võrreldes samade mõõtmetega kondensaatoriga, mille plaadid asuvad tühjuses.

Kondensaatori dielektrikusse salvestunud elektrivälja energia avaldub valemiga

$$W_e = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \text{ J.}$$

Pideva elektrivoolu tekitamiseks kasutatakse elektromotoorse jõu (emj.) allikaid. Emj. allikas on võimeline muundama kas keemilist, mehaanilist, valguse või mistahes muud liiki energiat elektrienergiaks. Emj. allika sees on laengute liikumise põhjuseks nn. kõrvaline elektriväli ja selle väljatugevus $\mathbf{E}_k$ või magnetvälja ajalisest muutumisest põhjustatud nn. indutseeritud elektriväli ja indutseeritud elektrivälja tugevus $\mathbf{E}_{ind.}$ Kõrvalise või indutseeritud elektrivälja tugevuse vektori joonintegraali nimetatakse *elektromotoorseks jõuks*. Emj. ühik on volt (V).

Resulteeriva elektrivälja tugevuse vektori **E**, s. o. elektrostaatilise, kõrvalise ja indutseeritud elektrivälja tugevuse vektorite summa joonintegraali nimetatakse *pingeks*. Pinge kahe punkti vahel ajaliselt muutuvas magnetväljas ja emj. allikate puhul sõltub, erinevalt potentsiaalide vahest, integreerimise teekonna valikust, mitte aga ainult integreerimisteekonna alg- ja lõpp-punktide asendist. Näiteks joonisel 0-3 näidatud keemilise vooluallika ja laetud kerade puhul ei sõltu kerade *A* ja *B* ja nendega ühendatud elektroodide potentsiaalide vahe integreerimise teekonnast, kuna aga pinge, s. t. resulteeriva elektrivälja tugevuse joonintegraal annab teekonnal väljaspool elektrolüüti võrdse väärtuse potentsiaalide vahega, elektrolüüdi sees aga väärtuse null. Resulteeriv elektrivälja tugevus peab voolu puudumisel juhtivas keskkonnas võrduma nulliga. Seega

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{st} + \mathbf{E}_k = 0$$

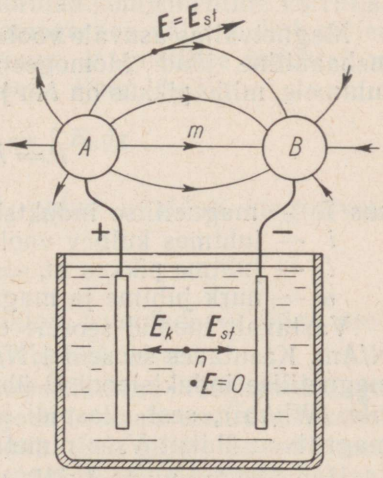
ehk

$$\mathbf{E}_{st} = -\mathbf{E}_k.$$

Elektromotoorne jõud

$$e = \int_B^A \mathbf{E}_k d\mathbf{l} = \int_A^B \mathbf{E}_{st} d\mathbf{l} = U_A - U_B.$$

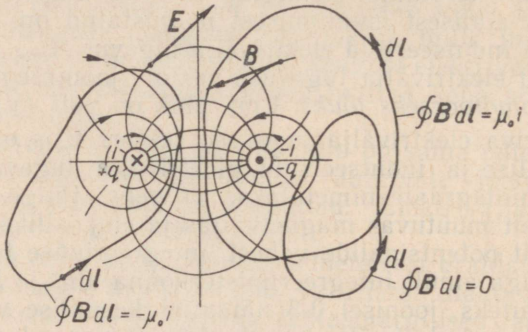
Alalisvoolu puhul laengute jaotus juhtmetel ajaliselt ei muutu, seega ka eletriväli jääb ajas muutumatuks. Alalisvoolu



Joon. 0-3. Keemilise vooluallika elektriväli

puhul esinevat elektrivälja ja selle elektrivälja tugevust nimetatakse *statsionaarseks.*

Magnetväljа iseloomustamiseks antud punktis kasutatakse *magnetilise induktsiooni* ehk magnetilise väljatiheduse mõistet. Magnetilise induktsiooni vektori suund ühtib magnetvälja antud punktis magnetnõela põhjapooluse poolt osutatud suunaga. Magnetilise induktsiooni vektori jooned on kahejuhtmelise alalisvooluliini juhtmevälise ruumi jaoks näidatud joonisel 0-4. Magnetilise induktsiooni vektori jooned ehk induktsioonijooned on, nagu näitavad praktilised kogemused, alati kinnised, lõputa ja alguseta.



Joon. 0-4. Alalisvooluliini juhtmevälises ruumis juhtmetega ristioleva pinna elektromagnetiline väli

Magnetväljas asuvale vooluga juhtmele (voolujuhtmele) mõjub mehaaniline jõud. Homogeenses magnetväljas asuvale sirgele juhtmele, mille pikkus on l m ja vool on i A, mõjub jõud

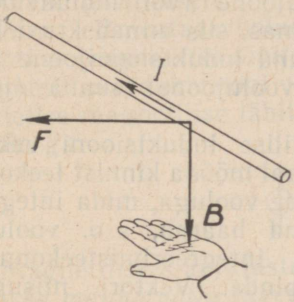
$$F = Bil \cos \alpha \text{ N},$$

kus B — magnetilise induktsiooni vektori moodul,
i — juhtmes kulgev vool A,
l — juhtme pikkus m,
α — nurk juhtme ja magnetilise induktsiooni joone vahel.

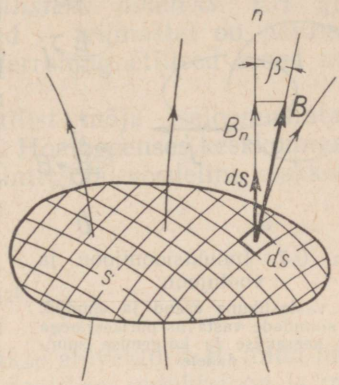
Vastavalt toodud seosele on magnetilise induktsiooni ühikuks N/Am. Kasutades seoseid 1 N/C = 1 V/m ja 1 C = 1 Asec, saame magnetilise induktsiooni B ühikuks Vsec/m^2 ehk *veeber ruutmeetrile* (Wb/m^2), sest edaspidi kirjeldatava füüsikalise suuruse nn. magnetvoo ühikut Vsec nimetatakse veebriks.

Homogeense magnetvälja magnetiline induktsioon on 1 Wb/m^2, kui välijoonega risti asetatud 1 m pikkusele sirgele juhtmele, mida läbib vool 1 A, mõjub mehaaniline jõud 1 N.

Magnetvälja induktsioonijoontega risti asetatud sirgele voolujuhtmele mõjuva jõu suund määratakse vasaku käe juhisega: kui asetada vasak käsi nii, et magnetilise induktsiooni jooned suunduvad peopessa ja väljasirutatud sõrmed ühtivad voolu suunaga (positiivse laengu liikumise suunaga), siis kõrvalesirutatud pöial näitab juhtmele mõjuva mehaanilise jõu suunda (joon. 0-5).



Joon. 0-5. Magnetvälja, voolu ja mehaanilise jõu suunad. Vasaku käe juhis



Joon. 0-6. Magnetilise induktsiooni vektori voo selgitamiseks

Vektorvälja iseloomustamiseks antud pinna suhtes kasutatakse vektori voo mõistet. *Vektori vooks* läbi pinna nimetatakse pinnaelementide ja vaadeldava vektori normaalkomponentide korrutiste summat kogu pinna kohta. Mittehomogeense välja puhul väljendub see summa integraaliga üle pinna. Magnetilise induktsiooni vektori **B** voog Φ läbi pinna s on seega (joon. 0-6)

$$\Phi = \int_s B \cos \beta \, ds = \int_s B_n ds.$$

Homogeense välja ja tasapinna puhul avaldub magnetvoog valemiga

$$\Phi = Bs \cos \beta,$$

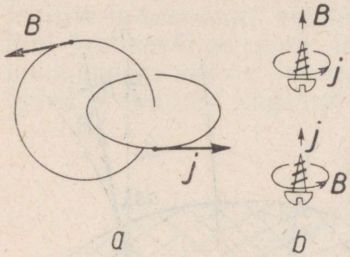
kus β — tasapinna normaali ja vektori suundade vaheline nurk.

Magnetvoo ühikuks on *veeber* (Wb) ehk Vsec.

Välja graafilisel kujutamisel joonestatakse välijooned sageli niisuguse arvestusega, et iga välijoon vastab teatud ühikvoole läbi välijoonega risti asetseva pinna. Sel puhul on välijoonte tihedus võrdeline välja intensiivsusega ja mingit pinda läbivate välijoonte arv on võrdeline seda pinda läbiva vooga.

Magnetväli on eranditult alati seoses elektrivooluga. Elektri-

vool ja tema magnetväli esinevad alati üheaegselt ja on õigupoolest ühe ja sama füüsikalise protsessi erinevad iseloomustajad. Voolujuhe on alati ümbritsetud magnetväljast, mille kinnised induktsioonijooned haaravad ehk aheldavad välja põhjustavat voolu. Et ka voolu teekond moodustab kinnise joone, siis magnetilise induktsiooni vektori joon ja voolujoon (voolutiheduse vektori joon) haaravad teineteist vastastikku (on teineteisest läbi) nagu ahela kaks lüli (joon. 0-7, *a*). Kui kujutleme pärikeermega kruvi liikumist voolujoone (või induktsioonijoone) suunas, siis annab kruvi keeramise suund induktsioonijoone (või vastavalt voolujoone) suuna (joon. 0-7, *b*).



Joon. 0-7. Induktsioonijoon ja voolujoon:
a — vastastikune asend ja suunad,
b — suundade vastavus pärikeermega kruvi keeramise ja kulgemise suundadele

Magnetilise induktsiooni vektori joonintegraal mööda kinnist teekonda on võrdeline vooluga, mida integreerimisteekond haarab, s. o. vooluga, mis läbib integreerimisteekonnaga piiratud pinda. Vektori niisugust joonintegraali nimetatakse ringintegraaliks ja tähistatakse sümboliga $\oint$. Tühjuse ehk vaakuumi puhul

$$\oint \mathbf{B}\,\mathrm{d}\mathbf{l} = \mu_0 i,$$

kus μ_0 — magnetiline konstant, mille mõõtühik on

$$1\,\frac{\mathrm{V\,sec}}{\mathrm{Am}} = 1\,\frac{\Omega\ \mathrm{sec}}{\mathrm{m}} = 1\,\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}},$$

sest 1 V/A = 1 Ω (oom) ja edaspidi kirjeldatava füüsikalise omaduse nn. induktiivsuse ühik henri (H) võrdub 1 Ω sec. Magnetilise konstandi väärtus on

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}.$$

Kui integreerimisteekonnaga piiratud pinda vool ei läbi, siis võrdub integraal nulliga. Voolu ja integreerimise suuna vastavuse puhul pärikeermega kruvi liikumise ja keeramise suundadele tuleb vool i võtta võrrandis positiivsena. Joonisel 0-4 on toodud mõned integreerimise teekonnad ja ringintegraalide väärtused.

Lugedes ümber aatomi tuuma tiirlevat elektroni vooluks, peame järeldama, et aine sees on mistahes joonlõik haaratud ehk ümbritsetud nendest nn. elementaarvooludest. Harilikult on haaravate elementaarvoolude summa siiski võrdne nulliga, kuna elementaarvoolude suunad on kaootilised. Magnetväljas asetsevas aines väli

suunab ehk orienteerib aine elementaarvoolusid. Aine elementaarvoolude korraldumist välise magnetvälja toimel nimetame *aine magneetumiseks*. Neid aineid, mille elementaarvoolud asetuvad magnetväljas selliselt, et need oma magnetväljaga mõjuvad välisele magnetväljale vastupidises suunas, nimetatakse *diamagnetilisteks aineteks*. Diamagnetilised ained magneetuvad negatiivselt. Aineid, mille elementaarvoolude magnetväli välist magnetvälja tugevdab, nimetatakse *paramagnetilisteks aineteks*. Eri grupi moodustavad ferromagnetilised ained — viimastel on paramagnetiline efekt eriti tugev. Para- ja ferromagnetilised ained magneetuvad positiivselt.

Aine elementaarvoolude magnetilist mõju iseloomustatakse *suhtelise magnetilise läbitavusega* μ_r. Homogeenses keskkonnas on magnetilise induktsiooni vektori joonintegraal võrdeline keskkonna suhtelise magnetilise läbitavusega.

Seega

$$\oint \mathbf{B}\,d\mathbf{l} = \mu_r \mu_0 i.$$

Magnetilistes arvutustes kasutatakse abivektorit **H**, mida nimetatakse *magnetvälja tugevuseks*. Magnetiline induktsioon ja magnetvälja tugevus on seotud järgmiselt:

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu \mathbf{H},$$

kus μ — aine absoluutne magnetiline läbitavus.

Magnetvälja tugevus on seega

$$\mathbf{H} = \frac{B}{\mu}.$$

Magnetvälja tugevuse ühikuks on $Wbm/m^2 H = A/m$, s. o. *amper jagatud meetriga*.

Magnetvälja tugevuse vektori ringintegraal

$$\oint \mathbf{H}\,d\mathbf{l} = i$$

ei sõltu aine molekulaarvooluidest, vaid võrdub integreerimisteekonnaga piiratud pinda läbiva välise (makroskoopilise) vooluga — nn. koguvooluga. Kirjeldatud ringintegraal väljendab nn. *koguvoolu seadust*. Koguvoolu all mõeldakse harilikult kõikide juhtmete voolude algebralist summat. Joonisel 0-8 näidatud integreerimisteekonna puhul

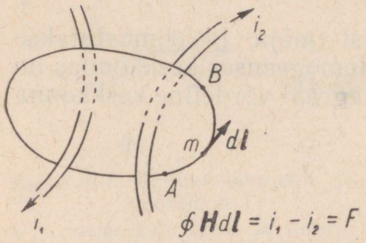
$$\oint \mathbf{H}\,d\mathbf{l} = i_1 - i_2.$$

Magnetvälja tugevuse vektori ringintegraal iseloomustab juhtmete voolude magneetivat toimet ja teda nimetatakse *magnetomotoorseks jõuks* (mmj.) ehk *magneetimisergutuseks F*. Kui inte-

greerimisteekond haarab pooli keerdude arvuga w, siis on mmj. võrdne keerdude arvu w ja voolu i korrutisega:

$$\oint \mathbf{H}\,d\mathbf{l} = F = iw.$$

Magnetvälja tugevuse vektori joonintegraal punktist A punkti B (joon. 0-8) võrdub nende punktide *magnetiliste* (skalaarsete) *potentsiaalide vahega*:



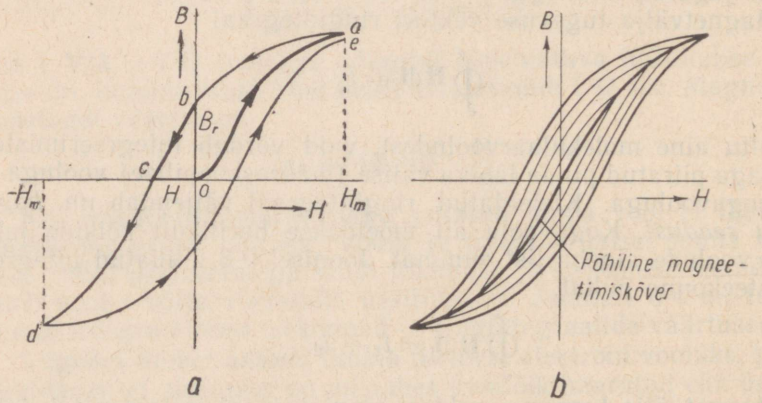
Joon. 0-8. Koguvool ja magneetimisergutus

$$\int_A^B \mathbf{H}\,d\mathbf{l} = U_{mA} - U_{mB}.$$

Magnetvälja tugevust võib vaadelda kui magnetiliste potentsiaalide vahet magnetvälja tugevuse vektori joone ühe pikkusühiku kohta.

Aine suhteline magnetiline läbitavus diamagnetilistel ainetel $\mu_r < 1$ ja paramagnetilistel ainetel $\mu_r > 1$, kuid on mõlemal juhul konstantne suurus, mille väärtus palju ei erine ühest. Ferromagnetilistel ainetel seevastu $\mu_r \gg 1$, kuid μ_r arvuline suurus sõltub aine eelnevast magnetilisest olukorrast ja magnetilise induktsiooni suurusest.

Ferromagnetilise materjali magneetumist iseloomustatakse B ja H sõltuvuse graafikuga, nn. *magneetimiskõveraga.* Joonisel 0-9, *a* iseloomustab kõver *Oa* materjali esmakordset magneetimist

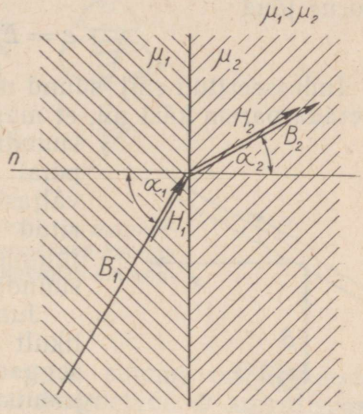


Joon. 0-9. Ferromagnetilise materjali magneetimiskõverad:
a — esmakordse magneetimise kõver ja lahtimagneetimise kõver, *b* — põhiline magneetimiskõver

magnetvälja tugevuse muutmisel nullist kuni väärtuseni H_m. Magnetvälja tugevuse vähendamisel nullini induktsioon väheneb kuni remanents- ehk jääkinduktsioonini B_r. Induktsiooni viimiseks nullini on vaja vastasmärgilise magnetvälja tugevuse H_c (nn. koertsitiivjõu) rakendamist. Teostades magneetimist kogu tsükli ($+H_m \to 0 \to -H_m \to 0 \to +H_m$) ulatuses, näeme, et sama magnetvälja tugevuse juures on tegemist erinevate magnetilise induktsiooni väärtustega. Peale kümmekonna magneetimistsükli läbimist saame nn. sümmeetrilise hüstereesi- ehk hilistumissilmuse (joon. 0-9, *b*). Hüstereesisilmuse pindala joonisel on võrdeline ühe magneetimistsükli vältel materjali ühe ruumiühiku magneetimiseks kulunud energiaga (J/m^3). Mitmesuguse maksimaalse väljatugevusega sümmeetriliste hüstereesisilmuste otspunktide ühendamisel saame nn. põhilise magneetimiskõvera.

Magnetväljas toimub kahe erineva magnetilise läbitavusega keskkonna puutepinnal välijoonte murdumine. Kuna induktsioonijooned on pidevad, siis keskkondade puutepinnaga risti olevad magnetilise induktsiooni vektorite komponendid on võrdsed (joon. 0-10):

$$B_1 \cos \alpha_1 = B_2 \cos \alpha_2.$$



Joon. 0-10. Magnetiline induktsioon ja magnetvälja tugevus kahe keskkonna puutepinnal

Koguvoolu seadusest järeldub, et magnetvälja tugevuse vektori komponendid, mis asetsevad keskkondade puutepinnas, ehk tangentsiaalkomponendid on võrdsed:

$$H_1 \sin \alpha_1 = H_2 \sin \alpha_2.$$

Jagades toodud võrdused, saame murdumisnurkade tangensite ja keskkondade magnetiliste läbitavuste vahelise seose:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}.$$

Ferromagnetilise keskkonna ja õhu puutepinnal õhus on välijooned praktiliselt pinnaga risti, sest $\mu_õ \ll \mu_{Fe}$ ja $\alpha_õ \approx 0$.

0-2. ELEKTROMAGNETILISE INDUKTSIOONI SEADUS

Kui magnetväljas liikuva laengu q kiiruse suund ei ühti magnetilise induktsiooni suunaga, siis mõjub laengule mehaaniline jõud **F**, mis on risti nii magnetilise induktsiooniga **B** kui ka kiiru-

sega **v**. Kui kiirus on magnetilise induktsiooniga risti, siis mehaaniline jõud

$$F = qvB.$$

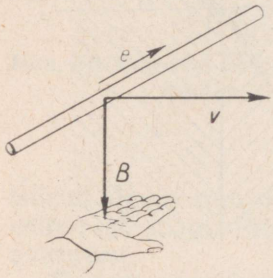
Magnetväljas liikuva laengu ühiku kohta tulevat jõudu nimetatakse indutseeritud elektrivälja tugevuseks:

$$E_{ind} = \frac{F}{q} = vB\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}.$$

Sirges juhtmes pikkusega l meetrit, mis liigub kiirusega v risti magnetilise induktsiooni joontega, indutseeritakse elektromotoorne jõud

$$e = E_{ind}l = Blv \text{ V}.$$

Indutseeritud emj. suund määratakse parema käe juhisega: kui asetada parem käsi nii, et magnetilise induktsiooni vektori jooned suunduvad peopessa ja kõrvalesirutatud pöial osutab liikumiskiiruse suunas, siis väljasirutatud sõrmed näitavad indutseeritud emj. suunda (joon. 0-11), seega juhtmes positiivsele laengule mõjuva jõu suunda.



Joon. 0-11. Magnetvälja, liikumiskiiruse ja indutseeritud emj. suund. Parema käe juhis

Juhtmes emj. indutseerimist võib näitlikult siduda induktsioonijoonte «lõikamisega» juhtme poolt. Kinnises kontuuris indutseeritakse emj. sel juhtumil, kui kontuuri osad liikumisel «lõigates» induktsioonijooni muudavad kontuuriga aheldatud ehk kontuuri poolt piiratud pinda läbivat magnetvoogu. Kontuuris indutseeritud emj. võrdub kontuuriga piiratud pinda läbiva magnetvoo vähenemise kiirusega, s. o.

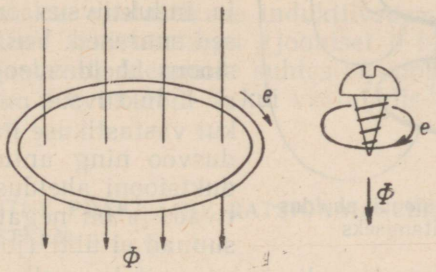
$$e = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \text{ V},$$

kui magnetvoo positiivne suund (õigupoolest magnetilise induktsiooni vektori joone suund) ja indutseeritud emj. positiivne suund on valitud vastavuses parema käe kruvi kulgemise ja keeramise suundadele (joon. 0-12). Positiivne voog indutseerib vähenedes $\left(\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} < 0\right)$ positiivse ja suurenedes $\left(\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} > 0\right)$ negatiivse emj., s. o. joonisel 0-12 näidatud suunale vastupidise emj. Indutseeritud emj. omab niisugust suunda, et emj. poolt põhjustatud vool tekitab lisamagnetvoo, mis oma suunalt on vastupidine voo kasvule: kui voog suureneb, siis indutseeritud voolu magnetvoog on voole vas-

tupidise suunaga, kui voog väheneb, siis indutseeritud voolu magnetvoog on voo suunaga.

Poolis indutseeritud emj. võrdub pooli kõikides keerdudes indutseeritud emj. summaga, mis on leitav pooli kõikide keerdude magnetvoogude summa abil:

$$e = e_1 + e_2 + \ldots + e_w = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\Phi_1 + \Phi_2 + \ldots + \Phi_w).$$



Joon. 0-12. Indutseeritud emj. ja magnetvoo positiivsete suundade vastavus parema käe kruvi keeramise ja kulgemise suundadele

Pooli kõikide keerdude magnetvoogude summa on ligikaudu võrdne keerdude arvu w ja ühe keeru magnetvoo Φ korrutisega. Mähise kõikide keerdudega aheldatud voogude summat nimetatakse aheldusvooks Ψ, s. o.

$$\Psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \ldots + \Phi_w \approx w\Phi.$$

Poolis indutseeritud emj. võrdub aheldusvoo vähenemise kiirusega

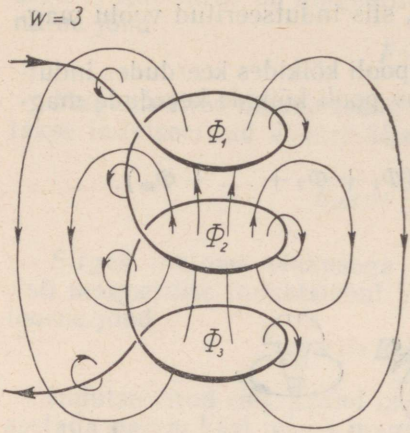
$$e = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}.$$

Pooli aheldusvoog võib olla põhjustatud pooli enese voolust (joon. 0-13) või voolust mõnes teises poolis (joon. 0-14). Esimesel juhtumil on tegemist nn. endainduktsiooni aheldusvooga Ψ_L ja teisel juhtumil vastastikuse induktsiooni aheldusvooga Ψ_M. Endainduktsiooni aheldusvoo ja voolu suhet nimetatakse *induktiivsuseks L:*

$$L = \frac{\Psi L}{i}.$$

Pooli induktiivsus iseloomustab pooli magnetilisest seisukohast.

Vastastikuse induktsiooni aheldusvoo ja teda põhjustava voolu suhet nimetatakse *vastastikuseks induktiivsuseks M:*



Joon. 0-13. Endainduktsiooni aheldusvoo mõiste selgitamiseks

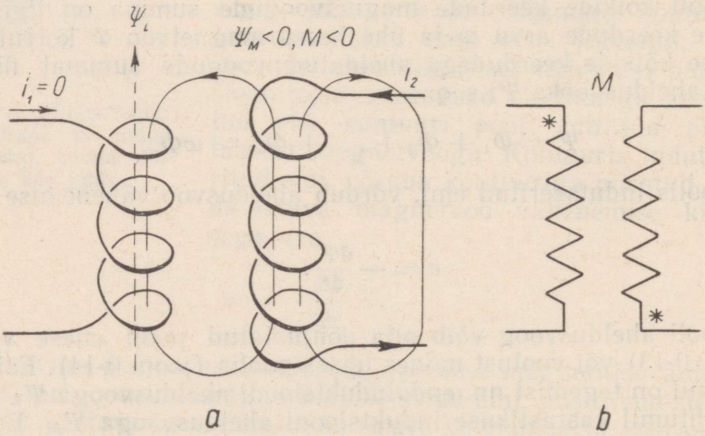
$$M = \frac{\Psi M}{i_2}.$$

Induktiivsuse ja vastastikuse induktiivsuse mõõtühikuks on Wb/A, mis kannab nimetust *henri* (H).

Endainduktsiooni aheldusvoog ja induktiivsus on alati positiivsed suurused. Vastastikuse induktsiooni aheldusvoog ja vastastikune induktiivsus on siis positiivsed, kui vastastikuse induktsiooni aheldusvoo ning antud pooli endainduktsiooni aheldusvoo suunad ühtivad, ja on negatiivsed, kui need suunad ei ühti (joon. 0-14, *a*).

Voolu muutumisel poolis indutseeritakse selles emj.

$$e_L = -L \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}.$$



Joon. 0-14. Vastastikuse induktsiooni aheldusvoo mõiste selgitamiseks:
a — magnetiliselt sidestatud poolid, *b* — nende skeem

Voolu muutumise ajal peab poolile rakenduma väline emj. ehk väline pinge *u*, mis on indutseeritud elektromotoorse jõuga võrdne ja vastasmärgiline. Seega

$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}.$$

Poolis voolu muutumisel nullist kuni väärtuseni i salvestatakse pooli magnetvälja energia

$$W_m = \int_0^{\infty} uidt = \int_0^{i} Lidi = \frac{Li^2}{2} = \frac{\Psi_L i}{2}.$$

Skeemil esitatakse vastastikuse induktiivsuse märk kahe vastava klemmi erilise tähistamisega (joonisel 0-14, *b* tähekestega klemmid). Kui vastavate klemmide suhtes on mõlemas poolis voolud samas suunas, siis on $M > 0$, kui vastupidises (nagu joonisel 0-14, *a*), siis $M < 0$.

0-3. ABSOLUUTNE PRAKTILINE RATSIONALISEERITUD MKSA ÜHIKUTE SÜSTEEM

NSV Liidus on käesoleval ajal elektrotehnilistes arvutustes ja mõõtmistel kasutusel nn. absoluutse praktilise ratsionaliseeritud MKSA ühikute süsteemi ühikud.

Absoluutseks nimetatakse seda süsteemi sellepärast, et tema nelja põhiühiku seas, mille abil tuletatakse kõik teised mehaanilised, elektrilised ja magnetilised ühikud, on pikkusühik, massühik ja ajaühik. Need ühikud on meeter, kilogramm (mass) ja sekund. Süsteemi nimetuses on vastavalt tähed MKS. Neljas põhiühik on elektrivoolu ühik amper — A.

Praktiliseks nimetatakse MKSA süsteemi sellepärast, et tema ühikute seas on palju tegelikkudel mõõtmistel ja arvutamistel suuruse poolest otseselt sobivad ühikud, nagu amper — A, volt — V, vatt — W, oom — Ω, henri — H jne. Muidugi ei ole keelatud vajaduse korral kasutada arvutus- või mõõtmistulemuse esitamisel 10 täisarvulise astme korda suuremaid ühikuid, nagu kilovatt ($1\ \mathrm{kW} = 10^3\ \mathrm{W}$), megavatt ($1\ \mathrm{MW} = 10^6\ \mathrm{W}$) või väiksemaid ühikuid, nagu sentimeeter ($1\ \mathrm{cm} = 10^{-2}\ \mathrm{m}$), millioom ($1\ \mathrm{m\Omega} = 10^{-3}\ \Omega$), mikrofarad ($1\ \mu\mathrm{F} = 10^{-6}\ \mathrm{F}$) või pikofarad ($1\ \mathrm{pF} = 10^{-12}\ \mathrm{F}$).

Ratsionaliseeritud ühikute süsteemi puhul need elektromagnetiliste suuruste valemid, mis käsitlevad sfäärilise sümmeetria olukorda, näiteks punktlaengu elektrivälja tugevuse avaldis, sisaldavad sfäärile iseloomulikku kordajat 4π, kuna aga need valemid, mis käsitlevad tasapinnalist probleemi, näiteks tasapinnalise kondensaatori mahtuvuse avaldis, kordajat 4π ei sisalda. Ratsionaliseerimata ühikute süsteemi puhul on 4π asukoht võrrandites vastupidine. Ratsionaliseeritud ühikute süsteemis on elektrilise ja magnetilise konstandi arvväärtused

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}},$$

$$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{H}}{\text{m}}.$$

Ratsionaliseerimata süsteemi puhul on need arvväärtused teised. Põhiühikute ning mehaaniliste, elektriliste ja magnetiliste ühikute nimetused, lühendatud tähistused eesti ja vene keeles ning mõningad ühikute omavahelised seosed ja vahekorrad teiste süsteemide ühikutega on esitatud tabelis 0-1.

Tabel 0-1

Absoluutse praktilise ratsionaliseeritud MKSA süsteemi ühikud

	Suurus	Nimetus	Tähistus eesti keeles	Tähistus vene keeles	Seoseid teiste ühikutega
Põhiühikud	pikkus	meeter	m	*м*	
	mass	kilogramm	kg	*кг*	
	aeg	sekund	sec	*сек*	
	vool	amper	A	*а*	
Mehaanilised ühikud	kiirus	meeter sekundis	$\frac{\text{m}}{\text{sec}}$	$\frac{м}{сек}$	
	kiirendus	meeter jagatud sekundruuduga	$\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$	$\frac{м}{сек^2}$	
	energia, töö	džaul e. vattsekund	J	*дж*	1 J = 10^7 ergi = 0,24 cal
	jõud	njuuton	N	*н*	1 N = $1\frac{\text{J}}{\text{m}} = 10^5$ düüni = = 0,102 kG*
	võimsus	vatt	W	*вт*	1 W = $1\frac{\text{J}}{\text{sec}} = 0{,}102\frac{\text{kGm}}{\text{sec}}$
Elektrilised ühikud	elektrilaeng	kulon	C	*к*	1 C = 1 Asec
	elektripotentsiaalide vahe, pinge, emj.	volt	V	*в*	1 V = $1\frac{\text{J}}{\text{C}}$
	elektrivälja tugevus	volt meetrile	$\frac{\text{V}}{\text{m}}$	$\frac{в}{м}$	$1\frac{\text{V}}{\text{m}} = 1\frac{\text{N}}{\text{C}}$
	elektrimahtuvus	farad	F	*ф*	1 F = $1\frac{\Omega}{\text{sec}} = 9 \cdot 10^{11}$ cm
	voolutihedus	amper ruutmeetrile	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$	$\frac{а}{м^2}$	$1\frac{\text{A}}{\text{m}^2} = 10^{-6}\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
	elektritakistus	oom	Ω	*ом*	1 Ω = $1\frac{\text{V}}{\text{A}}$
	elektrieritakistus	oom korda meeter	Ωm	*ом·м*	1 Ωm = $10^6\frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$
	elektrierijuhtivus	üks jagatud oom korda meetriga	$\frac{1}{\Omega\text{m}}$	$\frac{1}{ом \cdot м}$	$1\frac{1}{\Omega\text{m}} = 10^{-6}\frac{\text{m}}{\Omega\text{mm}^2}$

	Suurus	Nimetus	Tähistus: eesti keeles	Tähistus: vene keeles	Seoseid teiste ühikutega
Magnetilised ühikud	magnetvoog	veeber	Wb	*вб*	1 Wb = 1 Vsec = 10^8 maksvelli (Mx)
	magnetiline induktsioon	veeber ruutmeetrile	$\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$	$\frac{вб}{м^2}$	$1\frac{\text{Vb}}{\text{m}^2} = 10^4$ gaussi (Gs)
	magneetumine	amper meetrile	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$	$\frac{а}{м}$	$1\frac{\text{A}}{\text{m}} = 10^{-3}$ Gs
	magnetvälja tugevus	amper meetrile	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$	$\frac{а}{м}$	$1\frac{\text{A}}{\text{m}} = 4\pi \cdot 10^{-3}$ örstedi (Oe)
	induktiivsus	henri	H	*гн*	1 H = 1 Ω sec = 10^9 cm

* Märkus: kG — kilogramm-jõud; 1 kG = 9,81 N.

0-4. ELEKTRIAHEL ALALISVOOLU PUHUL

Elektrilaengute liikumist läbi mingi pinna, näiteks läbi juhtme ristlõikepinna nimetatakse *elektrivooluks* läbi selle pinna. Niisugust elektrivoolu, mis ajas ei muutu, nimetatakse *alalisvooluks*. Läbi pinna s kulgeva alalisvoolu i suurus määratakse ajavahemiku Δt jooksul pinda läbinud laengu Δq ja selle ajavahemiku suhtega, s. o.

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Ajaliselt muutuva voolu suurus teatud hetkel ehk hetkväärtus leitakse lõpmatult väheneva ajavahemiku dt jooksul pinda läbinud laengu dq kaudu, s. o. laengu tuletisena aja järgi

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

Vool i on skalaar ja tema väärtus alalisvoolu puhul iseloomustab ajaühikus mingisugust pinda läbinud summaarset laengut. Laengute liikumise suunda ja intensiivsust ruumi või pinna punktis väljendatakse vektoriaalse suurusega — voolutihedusega. *Voolutihedus* on võrdne antud punktis laengute liikumise suunaga risti asetatud pinna ühe ühiku kohta tuleva vooluga ja tema suund ühtib positiivse laengu liikumissuunaga (on vastupidine elektroni liikumissuunaga). Alalisvoolu puhul on ühtlase ristlõikega juhtmes voolutihedus

$$\Delta = \frac{i}{s},$$

kus s — juhtme ristlõige.

Voolutiheduse ühikuks on *amper ruutmeetrile* (A/m^2).

Juhtiva isotroopse keskkonna, nagu metalli või elektrolüüdi sees on voolutihedus võrdeline elektrivälja tugevusega. Seega

$$\Delta = \gamma E = \frac{1}{\varrho} E.$$

Skalaarset suurust γ nimetatakse aine *elektrierijuhtivuseks*, mille ühikuks on *üks jagatud oom korda meeter* (1/Ωm). Aine elektrierijuhtivuse pöördväärtust $\frac{1}{\gamma} = \varrho$ nimetatakse aine *elektrieritakistuseks*, mille ühik on *oom korda meeter* (Ωm). Aine erijuhtivus ja eritakistus iseloomustavad aine omadust juhtida elektrivoolu. Antud aine puhul sõltuvad erijuhtivus ja eritakistus aine lisanditest ja töötlusest ning temperatuurist. Metallide eritakistuse sõltuvus temperatuurist on praktiliselt lineaarne. Metalli eritakistuse ϱ_t temperatuuril t saab määrata eritakistusest ϱ_a temperatuuril t_a järgmise valemiga:

$$\varrho_t = \varrho_a \frac{\Theta + t}{\Theta + t_a}.$$

Selles avaldises on temperatuur Θ antud metalli nn. karakteristlik temperatuur. Metallide eritakistus temperatuuri tõusuga suureneb, elektrolüütidel ja söel (kasutatakse elektrimasinate harjades) aga väheneb.[1]

Elektriahelaks nimetame seadmete kogumit, mis moodustavad teekonna elektrivoolule. Elektriahelas esinevaid elektromagnetilisi protsesse kirjeldatakse elektromotoorsete jõudude, pingete ja vooludega. Alalisvooluahelas mõjuvate elektromotoorsete jõudude väärtused aja jooksul ei muutu. Alalisvoolu teekonna moodustavad harilikult juhtmed ja elektrolüütilised keskkonnad. Juhtmete sees on alalisvoolu puhul statsionaarne elektriväli resulteeriva väljatugevusega $E = \varrho\Delta$. Juhtme kahe ristlõike (joon. 0-15) potentsiaalide vahe ehk pinge

$$u = \int_l \mathbf{E}d\mathbf{l} = El = \varrho\Delta l = \frac{\varrho l}{s} i = ri,$$

kus l — ristlõigete vahekaugus, s — ristlõige.

Suurust

$$r = \frac{\varrho l}{s}$$

nimetatakse juhtmelõigu või juhtme *takistuseks*. Takistuse ühikuks on *oom* (Ω).

Juhtme vool on *Ohmi seaduse* alusel võrdne juhtmelõigu pinge ja juhtmelõigu takistuse jagatisega, s. o.

---

[1] Voolutiheduse teisi komponente peale kirjeldatud juhtivusvoolutiheduse, s. o. konvektsioonivoolutihedust (hõrendatud gaasides) ja nihkevoolutihedust (dielektrikutes) siin ei vaadelda, sest nad ei oma elektrimasinate seisukohalt olulist tähtsust.

$$i = \frac{u}{r}.$$

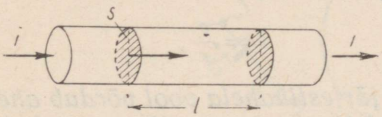
Takistuse pöördväärtust nimetatakse *juhtivuseks:*

$$g = \frac{1}{r} = \frac{\gamma s}{l}.$$

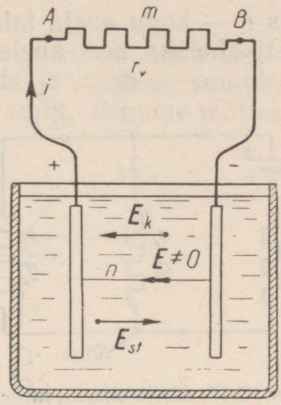
Juhtivuse ühikuks on *üks jagatud oomiga* (1/Ω).

Toodud juhtme takistuse ja juhtivuse avaldised on kasutatavad peale sirgete juhtmete ka elektrimasina mähiste takistuse arvutamiseks. Juhtme pikkuseks võetakse telgjoone pikkus.

Suletud elektriahelas, milles on elektromotoorse jõu allikas, näiteks elektrokeemiline nagu joonisel 0-16, tekib elektrivool *i*. Kuna allika elektrolüüdil on eritakistus ja voolutihedus allika sees ei ole



Joon. 0-15. Juhtmelõigu takistuse selgitamiseks



Joon. 0-16. Järjestikahel keemilise elektromotoorse jõu allikaga ja takistiga

võrdne nulliga, sest allikat läbib vool, siis on resulteeriv elektrivälja tugevus allika elektrolüüdis

$$E = \varrho\Delta \neq 0.$$

Resulteeriv elektrivälja tugevus on statsionaarse ja kõrvalise elektrivälja tugevuse summa. Moodustame joonintegraali elektriahela osal negatiivsest klemmist *B* läbi elektrolüüdi positiivse klemmini *A*:

$$\int_{BnA} \mathbf{E}d\mathbf{l} = \int_{BnA} \mathbf{E}_{st}d\mathbf{l} + \int_{BnA} \mathbf{E}_k d\mathbf{l} = \int_{BmA} \mathbf{E}d\mathbf{l} + \int_{BnA} \mathbf{E}_k d\mathbf{l}.$$

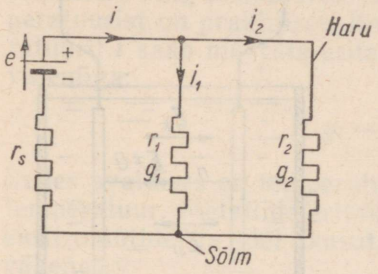
Avaldise esimeses joonintegraalis tehtud teekonna *BnA* asendus teekonnaga *AmB* põhineb asjaolul, et statsionaarse elektrivälja tugevuse joonintegraal ei sõltu teekonnast. Samas integraalis on $\mathbf{E}_{st}$ asendatud resulteeruva elektriväljatugevusega **E**, sest allikast väljaspool $\mathbf{E}_{st} = \mathbf{E}$. Avaldise kõrvalise elektrivälja tugevuse joonintegraali nimetasime elektromotoorseks jõuks *e*. Elektromotoorne jõud

$$e = \int_{BnA} E_k dl = \int_{AmB} Edl + \int_{BnA} Edl.$$

Võrrandi parema poole esimene osa kujutab endast pinget ahela välisel osal $u = r_v i$, kus r_v on ahela välise osa takistus ehk välistakistus. Teine osa kujutab endast pinget ehk pingelangu allika sisetakistusel r_s. Seega

$$e = u + r_s i = (r_v + r_s) i = ri,$$

kus r — kogu ahela takistus. Kirjeldatud ahelat nimetatakse järjestikahelaks, sest ahela kõiki osi läbib sama vool. Mitme takisti ja elektromotoorse jõu allikaga järjestikahelas liidame aritmeetiliselt sise- ja välistakistused ahela summaarseks takistuseks ja elektromotoorsed jõud algebraliselt ahela elektromotoorseks jõuks *e. Ohmi seadus* järjestikahelale on järgmine:



Joon. 0-17. Ahela skeem, milles kaks takistit on ühendatud paralleelselt

$$i = \frac{e}{r},$$

s. t. *järjestikahela vool võrdub ahela elektromotoorse jõu* ja ahela summaarse takistuse jagatisega.

Keerulisemate ühendustega ahela puhul nimetame *ahela haruks* niisugust ahela osa, mida läbib üks ja sama vool. Ahela kolme ja enama haru ühenduskohta nimetame *ahela sõlmeks* (joon. 0-17). Ahela sõlmega ühendatud harude voolude kohta kehtib *Kirchhoffi I seadus: elektriahela sõlme juurdevoolavate voolude summa võrdub äravoolavate voolude summaga.* Varustades juurdevoolavad voolud märgiga «+» ja äravoolavad voolud märgiga «—», võime kirjutada sõlme kohta

$$\sum_{k=1}^{k=n} i_k = 0.$$

Vastavalt joonisel 0-17 $i - i_1 - i_2 = 0$.

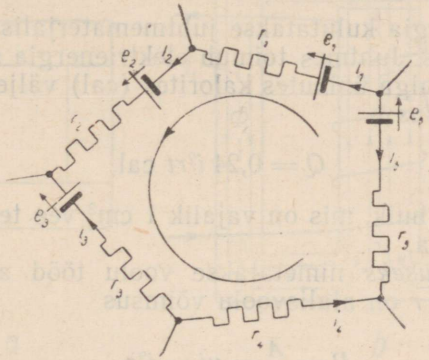
Kahe sõlmega ahelat nimetatakse paralleelahelaks. Paralleelahela nende harude voolud, mis ei sisalda elektromotoorsete jõudude allikaid, on võrdelised harude juhtivustega. Nende harude üldjuhtivus võrdub harude juhtivuste summaga. Näiteks joonisel 0-17 näidatud kahe haru puhul üldjuhtivus ja üldtakistus

$$g = g_1 + g_2; \quad r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Mistahes ühendusskeemiga ahelas vabalt valitud kinnise teekonna ehk kontuuri kõikide osade voolude, elektromotoorsete jõudude ja takistuste kohta kehtib *Kirchhoffi II seadus: elektriahela kinnises kontuuris on allikate elektromotoorsete jõudude algebraline summa võrdne kõikide kontuuri osade pingete algebralise summaga.* Seega

$$\sum_{k=1}^{k=n} e_k = \sum_{k=1}^{k=n} r_k i_k.$$

Võrrandi koostamisel Kirchhoffi II seaduse alusel tuleb eriliselt silmas pidada elektromotoorsete jõudude ja voolude suundi, s. o. märke. Koostades kontuuri kohta võrrandit, liigume mõttes



Joon. 0-18. Elektriahela kontuuri näide

mööda kontuuri teatud ringkäigu suunas. Need elektromotoorsed jõud, mille allikaid me läbime «—»-klemmilt «+»-klemmile, võtame positiivsetena. Nad on voolu põhjustajateks ringkäigu suunas. Elektromotoorsed jõud, mis on voolu põhjustajateks ringkäigule vastupidises suunas, võtame võrrandis negatiivsetena. Voolud, mille arvutuslikud suunad ühtivad ringkäigu suunaga, võtame võrrandis positiivsetena. Ringkäigu suunale vastupidised voolud võtame negatiivsetena. Joonisel 0-18 näidatud kontuuri jaoks saame Kirchhoffi II seaduse alusel

$$+e_1 + e_2 - e_3 + e_5 = i_1 r_1 + i_2 r_2 - i_3 r_3 + i_4 r_4 - i_5 r_5.$$

Ahelale võrrandite süsteemi koostamisel Kirchhoffi seaduste alusel peetakse silmas nn. arvutuslikke voolusuundi, mis kantakse skeemile meelevaldselt. Voolu jaoks võrrandite süsteemi lahendamisel saadud positiivne vastus tõendab arvutusliku voolusuuna vastavust tegelikule (positiivse laengu liikumissuunale), nega-

tiivne vastus aga tegeliku voolu vastassuunalisust antud harus, võrreldes arvutusliku suunaga.

Voolu töö ja võimsus on määratavad elektrivälja tööga laengute ümberpaigutamisel juhtmes. Laengu q liikumisel juhtmes kõrgemalt potentsiaalilt madalamale (voolu suunas) potentsiaalide vahe ehk pinge u ulatuses teevad välja jõud *töö*

$$A = uq.$$

Kuna alalisvoolu puhul

$$q = it,$$

siis alalisvoolu puhul võrdub töö pinge voolu ja aja korrutisega

$$A = uit.$$

See töö ehk energia kulutatakse juhtmematerjalis ja teda nimetatakse voolu tööks. Juhtmes toimub elektrienergia soojuseks muundumine. Soojushulga ühikutes kalorites (cal) väljendab voolu tööd *Lenz-Joule'i seadus:*

$$Q = 0{,}24\, i^2rt \text{ cal}.$$

1 cal on soojuse hulk, mis on vajalik 1 cm^3 vee temperatuuri tõstmiseks 1° C võrra.

Voolu *võimsuseks* nimetatakse voolu tööd ajaühikus. Ahela osas takistusega r on alalisvoolu võimsus

$$P = \frac{A}{t} = ui = i^2r.$$

Voolu võimsus võrdub pinge ja voolu korrutisega. Ajaliselt muutuva pinge ja voolu korral saame nende korrutisena nn. hetkvõimsuse, mida tähistatakse väikese tähega p.

Elektromotoorse jõu allika võimsus võrdub emj. ja voolu korrutisega:

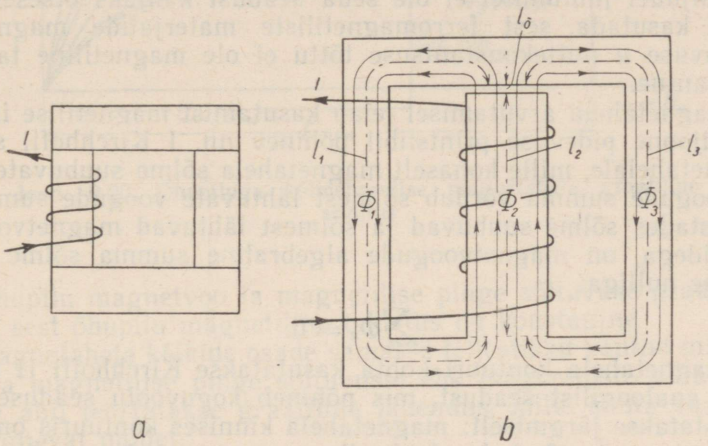
$$p = ei.$$

Võimsuse ühikuks on džaul sekundis ehk *vatt* (W): 1 W = = 1 J/sec.

Praktikas kasutatakse energia ehk töö ja võimsuse mõõtmiseks mitmesuguseid ühikuid. Seosed nende vahel on järgmised:

1 J = 1 Wsec = 0,24 cal = 0,102 kGm;
1 kWh = $3{,}6 \cdot 10^6$ J = 860 kcal;
1 kGm = 9,81 J; 1 cal = 4,19 J;
1 hj (hobujõud) = 75 kGm/sec = 736 W;
1 kW = 1,36 hj.

Magnetahelaks nimetatakse seadmete ja keskkondade kogumit, mille kaudu sulguvad magnetilise induktsiooni jooned, s. o. mida mööda kulgeb magnetvoog. Magnetahela osad valmistatakse harilikult ferromagnetilistest materjalidest, kuid magnetahela ühe osana tuleb sageli kasutada õhkvahemikku ehk õhupilu. Analoogiliselt elektriahelale kõneleme ka magnetahela puhul järjestikahelast (joon. 0-19, *a*) või paralleelahelast (joon. 0-19, *b*), mis koosneb mitmest harust. Järjestikahela ja paralleelahela haru mistahes ristlõikes on magnetvoog ligikaudu sama väärtusega.



Joon. 0-19. Magnetahel:
a — järjestikahel, *b* — paralleelahel õhupiluga

Ferromagnetilises ühtlase ristlõikega magnetahela osas on praktiliselt homogeenne magnetväli. Sel puhul on ahela osa magnetiline pinge U_m arvutatav magnetvälja tugevuse H ja magnetahela pikkuse, s. o. keskmise induktsioonijoone pikkuse l korrutisena:

$$U_m = Hl.$$

Magnetahela osa *magnetiliseks takistuseks* R_m nimetatakse magnetahela osa magnetilise pinge U_m ja ristlõike magnetvoo Φ jagatist:

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi}.$$

Lõigu konstantse ristlõike ja homogeense materjali puhul on magnetiline takistus võrdne induktsioonijoone keskmise pikkuse

jagatisega ristlõike ja keskkonna magnetilise läbitavuse korrutisega:

$$R_m = \frac{l}{\mu s} \frac{1}{\mathrm{H}}.$$

Magnetahela osa kohta kehtib Ohmi seadusega analoogiline seadus: magnetahela osa voog on võrdne magnetilise pinge ja takistuse jagatisega:

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m}.$$

Paljudel juhtumitel ei ole seda seadust kahjuks otseselt võimalik kasutada, sest ferromagnetiliste materjalide magnetilise läbitavuse μ mittekonstantsuse tõttu ei ole magnetiline takistus konstantne.

Magnetahela arvutamisel leiab kasutamist magnetilise induktsioonijoone pidevuse printsiibil põhinev nn. I Kirchhoffi seadus magnetahelale, mille kohaselt magnetahela sõlme suubuvate magnetvoogude summa võrdub sõlmest lähtuvate voogude summaga. Varustades sõlme suubuvad ja sõlmest lähtuvad magnetvood eri märkidega, on magnetvoogude algebraline summa sõlme kohta võrdne nulliga:

$$\sum \Phi_k = 0.$$

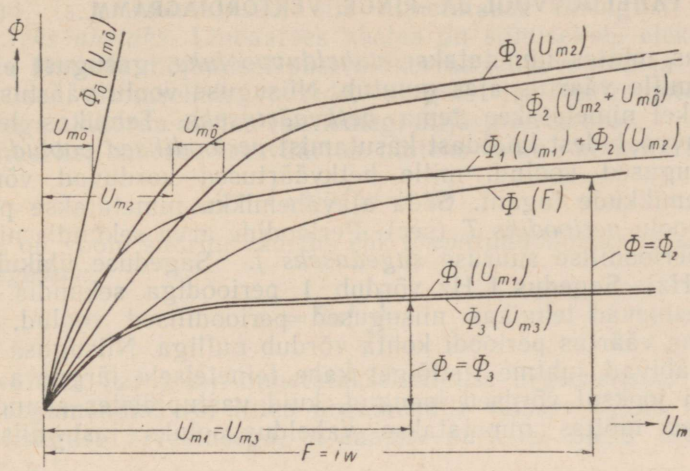
Magnetahela kontuuri kohta kasutatakse Kirchhoffi II seadusega analoogilist seadust, mis põhineb koguvoolu seadusel. See sõnastatakse järgmiselt: magnetahela kinnises kontuuris on magnetomotoorsete jõudude algebraline summa võrdne magnetiliste pingete algebralise summaga:

$$\sum F = \sum U_m.$$

Ferromagnetilise materjali magnetilise läbitavuse μ mittekonstantsuse tõttu arvutatakse magnetahel harilikult graafiliselt. Kasutades antud materjali magneetimiskõverat $B = f(H)$ ja ahelaosa geomeetrilisi mõõtmeid, arvutatakse ahela üksikutele osadele magnetvoo ja magnetilise pinge vaheline seos $\Phi = f(U_m)$. Seda tehakse järgmiselt: 1) antakse ette rida magnetilise induktsiooni B väärtusi; 2) arvutatakse magnetvoo väärtused seosega $\Phi = Bs$, kus s on ahelaosa ristlõige; 3) leitakse etteantud B väärtustele materjali magneetimiskõverast vastavad magnetvälja tugevuse H väärtused; 4) leitakse magnetilised pinged seosega $U_m = Hl$, kus l on magnetjoone keskmine pikkus ahelaosas; 5) ehitatakse ahelaosa Φ ja U_m sõltuvuse graafik.

Õhupilus on magnetiline induktsioon B_δ ja magnetvälja tugevus H_δ seotud lineaarselt

$$B_\delta = \mu_0 H_\delta,$$



Joon. 0-20. Õhupiluga kolmeharulise magnetahela graafiline arvutus

Õhupilu magnetvoo ja magnetilise pinge sõltuvuse graafik on sirge, sest õhupilu magnetiline takistus on konstantne.

Magnetahela kõikide osade samasse teljestikku kantud magnetvoo ja magnetilise pinge sõltuvuste ehk magnetiliste karakteristikute abil teostatakse graafiline lahendus, mille kohta vaatleme alljärgnevat näidet.

Joonisel 0-20 on antud kolmeharulise magnetahela (joon. 0-19, *b*) kahe välise haru, keskmise haru ja õhupilu karakteristikud $\Phi_1(U_{m1})$, $\Phi_3(U_{m3})$, $\Phi_2(U_{m2})$ ja $\Phi_\delta\ (U_{m\delta})$. Kuna vaadeldava ahela puhul on mähis keskmisel sambal, siis keskmise samba voog $\Phi = \Phi_2 = \Phi_\delta$ hargneb kaheks osaks, s. o. $\Phi = \Phi_1 + \Phi_3$. Ahelas mõjuvale magnetomotoorsele jõule iw vastavate voogude leidmiseks toimime järgmiselt: 1) summeerime kõverate $\Phi_1(U_{m1})$ ja $\Phi_3(U_{m1})$ magnetvood, sest nende harude voogude summa peab võrduma keskmise haru vooga Φ; 2) summeerime kõvera $\Phi_2(U_{m2})$ ja sirge $\Phi_\delta\ (U_{m\delta})$ magnetilised pinged, sest need osad on keskmises harus järjestikku; saame $\Phi(U_{m2} + U_{m\delta})$; 3) summeerime kõverate $\Phi(U_{m2} + U_{m\delta})$ ja $\Phi_1(U_m) + \Phi_3(U_m)$ magnetilised pinged, sest keskmine haru on järjestikku äärmiste harude paralleelühendusega; 4) saadud karakteristikult $\Phi(F)$ määrame ette-antud magnetomotoorsele jõule $F = iw$ vastava voo $\Phi = \Phi_2 = \Phi_\delta$ ning selle osad Φ_1 ja Φ_3 vastavatelt kõveratelt.

Laias mõttes nimetatakse *vahelduvvooluks* igasugust elektrivoolu, mille väärtus ajas muutub. Niisuguse voolu väärtust teatud hetkel nimetatakse tema *hetkväärtuseks.* Tehnikas leiavad vahelduvvooludest laialdast kasutamist *perioodilised voolud.* Need on niisugused voolud, mille hetkväärtused korduvad võrdsete ajavahemikkude tagant. Seda ajavahemikku nimetatakse perioodilise voolu *perioodiks T* (sec). Perioodide arvu sekundis nimetatakse perioodilise suuruse *sageduseks f.* Sageduse ühikuks on *herts* (Hz). Sagedus 1 Hz võrdub 1 perioodiga sekundis. Enamasti esinevad tehnikas niisugused perioodilised voolud, mille keskmine väärtus perioodi kohta võrdub nulliga. Niisuguse voolu puhul läbivad juhtme ristlõiget kahe teineteisele järgneva poolperioodi jooksul võrdsed laengud, kuid vastupidistes suundades. Kitsamas mõttes nimetatakse vahelduvvooluks just niisugust voolu.

Perioodilise vahelduvvoolu *i* võrdlemiseks alalisvooluga kasutatakse vahelduvvoolu efektiivväärtust *I.* Vahelduvvoolu *i efektiivväärtus I* on niisuguse alalisvoolu väärtus, mis takistusel *r* tekitab sama võimsuse kui vahelduvvool *i* perioodi *T* jooksul keskmiselt. Seega võrrandist

$$I^2 r = \frac{1}{T}\int_0^T i^2 r \, dt$$

saame voolu efektiivväärtuse avaldise

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}.$$

Perioodilise suuruse efektiivväärtus võrdub ruutjuurega keskmisest ruutväärtusest perioodi kohta. Elektrilised osutimõõteriistad näitavadki harilikult perioodiliste vahelduvvoolude ja -pingete efektiivväärtusi.

Peamist tähtsust omab vahelduvvooludest siinuseline vahelduvvool. Siinuselise voolu hetkväärtus on aja funktsioon siinuse järgi. On teada, et reostaati, kondensaatorit või pooli läbiva siinuselise voolu tõttu tekivad nende klemmidel perioodilised pinged. Seega tuleb kõnelda peale vahelduvvoolude ka vahelduvpingetest ja vahelduvatest elektromotoorsetest jõududest.

Niisugust olukorda elektriahelas, mille juures kõik pinged ja voolud on perioodilised (või ajas muutumatud — konstantsed) nimetatakse *püsivolukorraks* vastandina nn. *siirdeolukorrale,* mis tekib ahelas kohe tema sisselülitamise järel. Kui ahela kõikide osade takistused, induktiivsused ja mahtuvused on vooludest sõl-

tumatud, s. t. konstantsed, siis nimetatakse niisugust ahelat *lineaarseks ahelaks*. Lineaarses ahelas on siinuseliste elektromotoorsete jõudude mõjumisel püsivolukorras kõik voolud ja pinged siinuselised. Siinuseliste voolude, pingete ja elektromotoorsete jõududega olukorda ahelas vaatlemegi alljärgnevas osas.

Siinuselise suuruse hetkväärtus, näiteks voolu i hetkväärtus

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

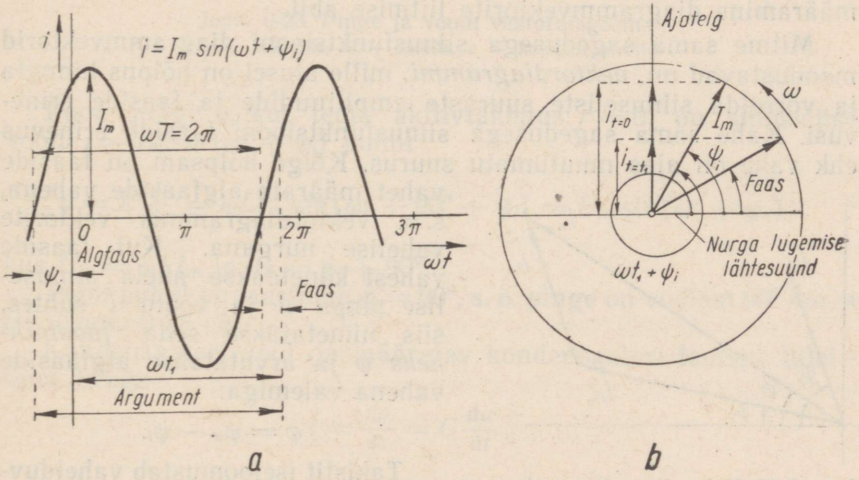
Siin I_m on voolu suurim väärtus ehk *amplituudväärtus* ja ω voolu *nurksagedus:*

$$\omega = 2\pi f \frac{1}{\text{sec}}.$$

Sulgavaldist $(\omega t + \psi_i)$ nimetatakse siinuse *argumendiks*. Lahutades argumendist või liites argumendile täisarv korda 2π ehk 360° niisuguse arvestusega, et saadav nurk ei oleks üle täispöörde, s. t.

$$-2\pi < (\omega t + \psi_i) - n2\pi < 2\pi,$$

saame siinust määrava nurga ehk siinuse või siinuselise suuruse *faasi*. Suurust ψ_i, mis on tavaliselt piirides $-2\pi < \psi_i < 2\pi$, nimetatakse *algfaasiks*. Algfaas määrab siinuselise suuruse hetkel $t = 0$. Joonisel 0-21, *a* on näidatud siinuselise voolu muutumise graafik, argument ja faas hetkele t_1. Siinuselise suuruse efektiivväärtus on $\sqrt{2}$ korda väiksem amplituudväärtusest: $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx$ $\approx 0{,}707\ I_m$.



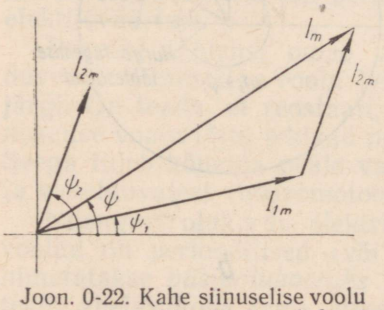
Joon. 0-21. Siinuseline vool:
a — muutumise graafik, *b* — vektordiagramm

Kuna ahela siinuselises püsivolukorras muutuvad kõik pinged ja voolud sama nurksagedusega ω, siis siinuselise suuruse muutumise iseloom on määratud, kui on teada tema amplituud (või efektiivväärtus) ja algfaas. Siinuselise suuruse amplituudi ja algfaasi iseloomustab graafikust paremini diagrammvektor. *Diagrammvektor* on siinuselise suuruse iseloomustamiseks mingist punktist joonisel nurgalugemise lähtesuunast positiivses (kellaosuti liikumisele vastupidises) suunas algfaasiga võrdse nurga võrra pööratud ja amplituudväärtusega võrdelise pikkusega joonestatud vektor. Joonisel 0-21, *b* on näidatud voolu diagrammvektor. Diagrammvektori projektsioon nurgalugemise lähtesuunast 90° võrra ette pööratud suunale nn. ajateljele, annab suuruse väärtuse hetkel $t = 0$. Mistahes muu hetkväärtuse saamiseks tarvitseb vaid diagrammvektorit pöörata faasi või argumendi väärtuseni ja leida projektsioon ajateljele (näit. $i = i_{t=t_1}$ joonisel 0-21, *b*). Kui kujutleda diagrammvektorit roteeruvana nurkkiirusega ω, siis muutub tema projektsioon ajaliselt siinuseliselt ja iseloomustab hetkväärtuse muutumist. Samahästi võib kujutada roteeruvana hetkväärtuse määramiseks ka ajatelge. Viimane peab roteeruma vastupidises suunas eelnimetatud vektorite roteerumissuunale.

Kahe siinusfunktsiooni summa või vahe on samuti siinusfunktsioon. Summa- või vahesiinusfunktsiooni amplituudi ja algfaasi on hõlpus leida liidetavate või lahutatavate siinusfunktsioonide diagrammvektorite summa või vahe abil — tarvitseb vaid teostada vastav tehe diagrammvektoritega ja määrata otsitav amplituud ja algfaas jooniselt. Joonisel 0-22 on näidatud kahe siinuselise voolu i_1 ja i_2 summa i amplituudi I_m ja algfaasi ψ graafiline määramine diagrammvektorite liitmise abil.

Mitme sama sagedusega siinusfunktsiooni diagrammvektorid moodustavad nn. *vektordiagrammi*, mille alusel on hõlpus hinnata ja võrrelda siinuseliste suuruste amplituudide ja faaside erinevusi. Kahe sama sagedusega siinusfunktsiooni faaside erinevus ehk vahe on ajas muutumatu suurus. Kõige hõlpsam on faaside vahet määrata algfaaside vahena, s. o. vektordiagrammis vektorite vahelise nurgana. Kui faaside vahest kõneldakse ahela siinuselise pinge u ja voolu i suhtes, siis nimetatakse seda *faasinihkeks* φ ja arvutatakse algfaaside vahena valemiga:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$



Joon. 0-22. Kahe siinuselise voolu summa amplituudi ja algfaasi määramine

Takistit iseloomustab vahelduvvoolu puhul tema *aktiivtakistus r*, mis on juhtme materjalis vahel-

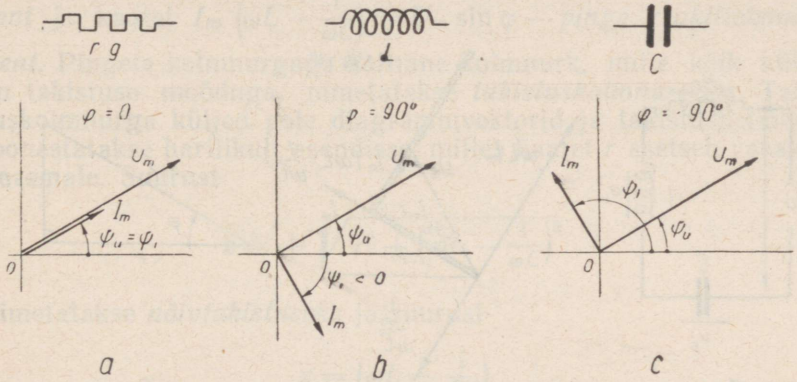
duvmagnetvälja poolt indutseeritud voolude tõttu mõnevõrra suurem tema takistusest alalisvoolule. Aktiivtakistuse pöördväärtust nimetatakse *aktiivjuhtivuseks g*. Pinge ja voolu hetkväärtused on takisti või reguleeritava takisti ehk reostaadi puhul seotud Ohmi seadusega:

$$i = \frac{u}{r} = ug = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi_u)}{r} = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

kus

$$I_m = \frac{U_m}{r} = U_m g \quad \text{ja} \quad \psi_i = \psi_u.$$

Takisti puhul on faasinihe φ võrdne nulliga, s. t. pinge ja vool on faasis. Pinge ja voolu vektorite vaheline nurk on null (joon. 0-23, *a*).



Joon. 0-23. Pinge ja voolu vektordiagramm:
a — takistile, *b* — poolile, *c* — kondensaatorile

Pooli pinge u, kui tema aktiivtakistus $r = 0$, on siinuselise voolu $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ puhul

$$u = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t + 90° + \psi_i) = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

kus $U_m = \omega L I_m$ ja $\psi_u = \psi_i + 90°$.

Pooli puhul on faasinihe $\varphi = 90°$, s. o. pinge on voolust 90° võrra ees (joon. 0-23, *b*).

Kondensaatori vool on määratav kondensaatori laengu tuletisena. Seega

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}.$$

Kondensaatorile rakendatud siinuselise pinge $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ puhul on tema vool

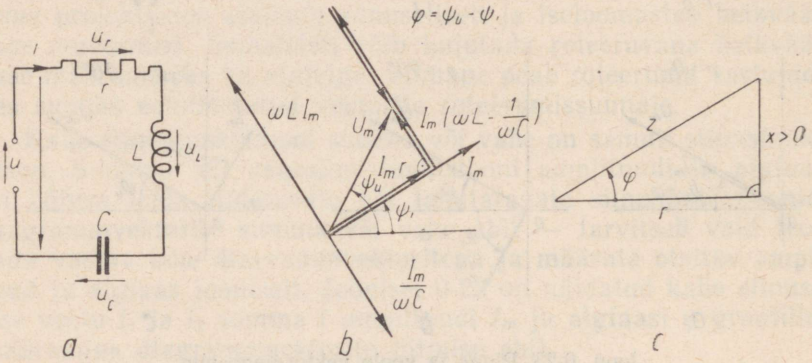
$$i = \omega C U_m \sin(\omega t + 90° + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

kus $I_m = \omega C U_m$ ja $\psi_i = \psi_u + 90°$. Kondensaatori puhul on faasinihe $\varphi = -90°$, s. o. vool on pingest 90° võrra ees (joon. 0-23, *c*).

0-7. VAHELDUVPINGED JA -VOOLUD JÄRJESTIK- JA PARALLEELAHELAS. TAKISTUSED JA JUHTIVUSED. VÕIMSUS

Takisti, pooli ja kondensaatori vektordiagrammide (joon. 0-23) alusel võime määrata nende järjestikühenduse — *r*, *L*, *C* järjestikahela üldpinge amplituudi ja algfaasi. Joonisel 0-24, *a* näidatud ahelas on Kirchhoffi II seaduse alusel

$$u = u_r + u_L + u_C.$$



Joon. 0-24. *r*, *L*, *C* järjestikahel:
a — skeem, *b* — vektordiagramm, *c* — takistuskolmnurk

Kuna ahela kõiki osi läbib sama vool $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, siis vektordiagrammis (joon. 0-24, *b*) on u_r, u_L ja u_C diagrammvektorid rI_m, $\omega L I_m$ ja $\frac{I_m}{\omega C}$ kantud vastavalt vooluvektori suunas, sellest 90° ette ja 90° järele. Nende diagrammvektorite summa võrdubki üldpinge diagrammvektoriga U_m. Üldpinge amplituud U_m ja faasinihe φ on leitavad täisnurksest kolmnurgast:

$$U_m = I_m \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}.$$

Pinge algfaas on voolu algfaasist faasinihke võrra suurem, seega

$$\psi_u = \psi_i + \varphi.$$

Antud üldpinge $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ puhul on vool

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi).$$

Vektordiagrammi (joon. 0-24, *b*) täisnurkset kolmnurka, mille hüpotenuusiks on üldpinge vektor U_m ja üks kaatet on vooluvektori suunas ja teine vooluvektoriga risti, nimetatakse *pingekolmnurgaks*. Kaatet $I_m r = U_m \cos\varphi$ kannab nimetust *pinge aktiivkomponent* ja kaatet $I_m \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = U_m \sin\varphi$ — *pinge reaktiivkomponent*. Pingete kolmnurgaga sarnane kolmnurk, mille kõik küljed on takistuse mõõduga, nimetatakse *takistuskolmnurgaks*. Takistuskolmnurga küljed pole diagrammvektorid ja takistuskolmnurk joonestatakse harilikult asendisse, milles kaatet r asetseb vasakult paremale. Suurust

$$z = +\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

nimetatakse *näivtakistuseks* ja suurust

$$x = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

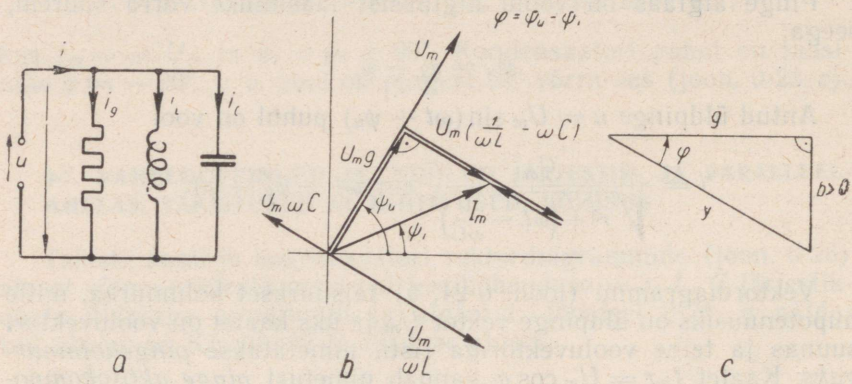
reaktiivtakistuseks. Aktiivtakistus r ja näivtakistus z on alati positiivsed, kuna reaktiivtakistus x võib olla positiivne või negatiivne. Pooli reaktiivtakistus $x_L = \omega L > 0$, kondensaatori reaktiivtakistus $x_C = -\frac{1}{\omega C} < 0$. Järjestikahela vool avaldub takistuste kaudu järgmiselt:

$$i = \frac{U_m}{z} \sin\left(\omega t + \psi_u - \operatorname{arc\,tg}\frac{x}{r}\right).$$

Takisti, pooli ja kondensaatori paralleelühenduse — g, L, C paralleelahela üldvoolu amplituudi ja algfaasi leiame vektordiagrammi abil. Joonisel 0-25, *a* näidatud ahelas on Kirchhoffi I seaduse alusel

$$i = i_g + i_L + i_C.$$

Kuna ahela kolmel harul on sama pinge $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, siis vektordiagrammis (joon. 0-25, *b*) on i_g, i_L ja i_C diagrammvek-



Joon. 0-25. g, L, C paralleelahel:
a — skeem, *b* — vektordiagramm, *c* — juhtivuskolmnurk

torid gU_m, $\frac{U_m}{\omega L}$ ja $\omega C U_m$ kantud vestavalt pingevektori suunas, sellest 90° järele ja 90° ette. Nende diagrammvektorite summa võrdubki üldvoolu diagrammvektoriga I_m. Üldvoolu amplituud I_m ja faasinihe φ on leitavad täisnurksest kolmnurgast:

$$I_m = U_m \sqrt{g^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2},$$

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{g}.$$

Voolu algfaas on pinge algfaasist faasinihke võrra väiksem, seega

$$\psi_i = \psi_u - \varphi.$$

Voolu hetkväärtus on seega

$$i = U_m \sqrt{g^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi).$$

Vektordiagrammi (joon. 0-25,*b*) täisnurkset kolmnurka, mille hüpotenuusiks on üldvoolu vektor I_m ja mille üks kaatet on pingevektori suunas ning teine pingevektoriga risti, nimetatakse *voolukolmnurgaks*. Kaatet $U_m g = U_m \cos\varphi$ kannab nimetust *voolu aktiivkomponent* ja kaatet $U_m\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right) = U_m \sin\varphi$ — *voolu reaktiivkomponent*. Voolukolmnurgaga sarnane kolmnurk, mille kõik küljed on juhtivuse mõõduga, nimetatakse *juhtivuskolmnurgaks*. Juhtivuskolmnurk joonestatakse asendisse, milles kaatet g

asetub vasakult paremale. Suurust $y = +\sqrt{g^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}$ nimetatakse *näivjuhtivuseks* ja suurust $b = \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)$ *reaktiivjuhtivuseks*. Aktiivjuhtivus g ja näivjuhtivus y on positiivsed suurused, kuna reaktiivjuhtivus b võib olla positiivne või negatiivne. Pooli reaktiivjuhtivus $b_L = \frac{1}{\omega L} > 0$, kondensaatori reaktiivjuhtivus $b_C = -\omega C < 0$. Paralleelahela vool avaldub juhtivuste kaudu järgmiselt:

$$i = U_m y \sin\left(\omega t + \psi_u - \operatorname{arc\,tg}\frac{b}{g}\right).$$

Pingete ja voolude vektordiagramme joonestatakse sageli efektiivväärtustele vastavate pikkustega. Sel puhul on kõik vektorid $\sqrt{2}$ korda amplituudväärtustest lühemad.

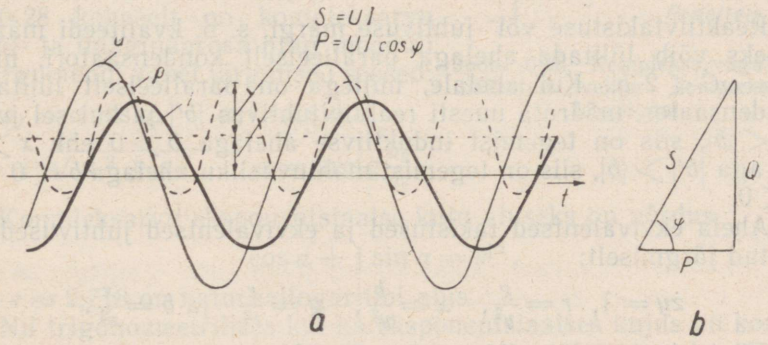
Teades ahela vahelduvpinge ja -voolu hetkväärtusi u ja i, võime nende korrutisena määrata võimsuse hetkväärtuse ehk *hetkvõimsuse* p:

$$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \psi_u)\sin(\omega t + \psi_i) =$$

$$= \frac{U_m I_m}{2}\left[\cos(\psi_u - \psi_i) - \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)\right].$$

Hetkvõimsuse avaldise trigonomeetrilisel teisendusel saadud kahest komponendist esimene osa kujutab endast alaliskomponenti ja teine vahelduvkomponenti amplituudväärtusega $\frac{U_m I_m}{2}$ (joon. 0-26, *a*).

Keskmine võimsus perioodi kohta



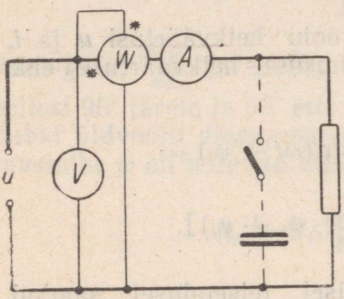
Joon. 0-26. Võimsus vahelduvvoolu ahelas:
a — hetkvõimsuse graafik, *b* — võimsuskolmnurk

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{U_m I_m}{2}\cos(\psi_u - \psi_i) = UI\cos\varphi\ \text{W},$$

kus U ja I on pinge ja voolu efektiivväärtused ja φ — faasinihe. Cos φ nimetatakse *võimsusteguriks*. Perioodi keskmist võimsust nimetatakse *aktiivvõimsuseks*. Pinge ja voolu efektiivväärtuste korrutist, mis võrdub võimsuse hetkväärtuse vahelduvkomponendi amplituudiga, nimetatakse *näivvõimsuseks S:*

$$S = \frac{U_m I_m}{2} = UI.$$

Elektrimasina kadude seisukohalt on oluline just näivvõimsus S, mille ühikuks on *voltamper* VA. Täisnurkset kolmnurka, mille hüpotenuus võrdub näivvõimsusega ja üks kaatet aktiivvõimsusega (joon. 0-26, *b*), nimetatakse *võimsuskolmnurgaks*. Võimsuskolmnurga kaatetit $Q = UI\sin\varphi$ nimetatakse *reaktiivvõimsuseks* ja tema ühik on *reaktiivne voltamper* var. Võib näidata, et reaktiivvõimsus on võrdne elektromagnetilise välja energia muutumise kiiruse amplituudväärtusega.



Joon. 0-27. Ekvivalentsete parameetrite määramise skeem

Voltmeetri, ampermeetri ja vattmeetri abil võime määrata ahela pinge ja voolu efektiivväärtused ja aktiivvõimsuse (joon. 0-27). Nende kaudu saab arvutada, kas järjestiklülituse ekvivalentsed takistused

$$z = \frac{U}{I},\ r = \frac{P}{I^2} \quad \text{ja} \quad |x| = \sqrt{z^2 - r^2},$$

või paralleellülituse ekvivalentsed juhtivused

$$y = \frac{I}{U}, \qquad g = \frac{P}{U^2} \quad \text{ja} \quad |b| = \sqrt{y^2 - g^2}.$$

Reaktiivtakistuse või -juhtivuse märgi, s. o. kvaliteedi määramiseks võib lülitada ahelaga paralleelselt kondensaatori, mille $b_C = \omega C < 2|b|$. Kui ahelale, millega on paralleelselt lülitatud kondensaator, määrata uuesti reaktiivjuhtivus $|b'|$ ja kui sel juhul $|b'| < |b|$, siis on tegemist induktiivse ahelaga $b > 0$ ehk $x > 0$, kui aga $|b'| > |b|$, siis on tegemist mahtuvusliku ahelaga $b < 0$ ehk $x < 0$.

Ahela ekvivalentsed takistused ja ekvivalentsed juhtivused on seotud järgmiselt:

$$zy = 1,\ r = \frac{g}{y^2},\quad x = \frac{b}{y^2},\quad g = \frac{r}{z^2} \quad \text{ja}\ b = \frac{x}{z^2}.$$

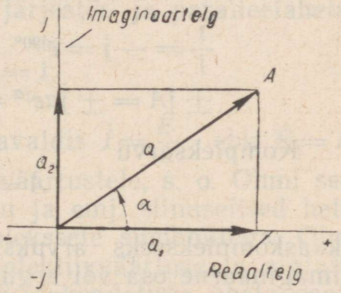
Ekvivalentne näivtakistus ja näivjuhtivus on teineteise pöördväärtused.

Siinuseliste voolude ja pingetega ahela arvutamise hõlbustamiseks ja näitlikuks tegemiseks kasutatakse, nagu nägime eespool, vektordiagrammi. Diagrammvektorite liitmise ja lahutamisega määratakse siinuseliselt muutuvate suuruste summa ja vahe amplituud või efektiivväärtus ja algfaas. Siin vaatleme vektordiagrammi kompleksse tasapinnal. *Kompleksse tasapinna* ühel koordinaatteljel on reaalsed arvud — *reaaltelg* ja teisel imaginaarsed arvud — *imaginaartelg*. Igale kompleksarvule vastab kompleksse tasapinnal teatud punkt. Lugedes kompleksarvuga määratud punkti vektori lõpp-punktiks ja koordinaatide algust vektori alguspunktiks, vastab igale kompleksarvule vektor. Vektorite liitmine—lahutamine on asendatav kompleksarvude liitmise—lahutamisega. Tehted diagrammvektoritega asenduvad kompleksarvude algebraliste tehetega.

Kompleksarvu A, seega vektorit komplekssel tasapinnal, väljendatakse kas algebralises, trigonomeetrilises, eksponentsiaalses või polaarses kujus. Need on vastavalt:

$$A = a_1 + ja_2 = a(\cos\alpha + j\sin\alpha) = ae^{j\alpha} = a\underline{/\alpha}\,.$$

Siin esinev nn. imaginaarühik $j = \sqrt{-1}$. Algebralises kujus on kompleksarv antud oma reaalse osaga a_1 ja imaginaarse osaga a_2. Tõlgendades kompleksarvu vektorina on a_1 ja a_2 vektori projektsioonid reaal- ja imaginaarteljele — seega positiivsed või negatiivsed reaalarvud. Trigonomeetrilises kujus nimetatakse reaalarvu a, mis loetakse alati positiivseks, kompleksarvu mooduliks ja nurka α kompleksarvu argumendiks.



Joon. 0-28. Kompleksarvuga A määratud vektor komplekssel tasapinnal

Kompleksarvu moodul on vektori pikkus ja argument on nurk, mida vektor moodustab reaalteljega. Joonise 0-28 kohaselt on kompleksarvu reaal- ja imaginaarosa ning mooduli ja argumendi vahel järgmised seosed:

$$a_1 = a\cos\alpha, \qquad a_2 = a\sin\alpha,$$

$$a = +\sqrt{a_1^2 + a_2^2}, \qquad \alpha = \operatorname{arctg}\frac{a_2}{a_1}.$$

Kompleksarvu eksponentsiaalse kuju aluseks on võrdus

$$\cos\alpha + j\sin\alpha = e^{j\alpha},$$

kus $e \approx 2{,}718$ on naturaallogaritmi alus.

Nii trigonomeetrilises kui ka eksponentsiaalses kujus on kompleksarv antud oma mooduli ja argumendiga. Lihtsamaks kompleksarvu kirjutamise mooduseks on polaarne kuju, mispuhul on

antud kompleksarvu moodul a ja argument nurga märgi sees $\underline{/a}$.

Kasutades toodud seoseid, leiame, et

$$e^{j0} = e^{j2\pi} = 1 = 1 = \underline{/0},$$

$$e^{\pm j\,\pi/2} = \pm j = 1\,\underline{/\pm 90°},$$

$$e^{\pm j\pi} = -1 = 1\,\underline{/\pm 180°}.$$

Kompleksarvude A ja B summa või vahe määramisel on otstarbekas kasutada algebralist kuju:

$$A \pm B = (a_1 + ja_2) \pm (b_1 + jb_2) = (a_1 \pm b_1) + j(a_2 \pm b_2).$$

Kompleksarvu A korrutamisel või jagamisel kompleksarvuga B või kompleksarvu astendamisel (juurimisel) on otstarbekas kasutada eksponentsiaalset kuju:

$$AB = abe^{j\alpha}\, e^{j\beta} = abe^{j(\alpha+\beta)},$$

$$\frac{A}{B} = \frac{ae^{j\alpha}}{be^{j\beta}} = \frac{a}{b}\, e^{j(\alpha-\beta)},$$

$$A^{\frac{n}{m}} = \left(ae^{j\alpha}\right)^{\frac{n}{m}} = a^{\frac{n}{m}}\, e^{j\frac{\alpha n}{m}}.$$

Oluline on silmas pidada, et

$$\frac{1}{j} = -j = e^{j90°}$$

$$\pm jA = \pm jae^{j\alpha} = ae^{j(\alpha \pm 90°)}.$$

Kompleksarvu

$$A = a_1 + ja_2 = ae^{j\alpha}$$

kaaskompleksseks arvuks $\overset{*}{A}$ nimetatakse kompleksarvu, mille imaginaarne osa või argument on võetud vastasmärgiga, s. o.

$$\overset{*}{A} = a_1 - ja_2 = ae^{-j\alpha}.$$

Kompleksarvu korrutis oma kaaskompleksse arvuga on võrdne kompleksarvu mooduli ruuduga

$$A\overset{*}{A} = a^2.$$

Siinuselise suuruse, nagu voolu, pinge jne. diagrammvektor, mille pikkus on teatud mõõdus võrdne kas amplituudiga või efektiivväärtusega ja mis asetseb reaaltelje suunast algfaasiga võrdse nurga all, tähistatakse punktiga tähtsümboli peal ja nimetatakse siinuselise suuruse kompleksiks amplituudiks või efektiivväärtu-

seks. Näiteks $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$ on voolu kompleksne amplituud ja $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$ pinge kompleksne efektiivväärtus.

Kuna r, L, C järjestikahelas takisti, pooli ja kondensaatori pingete vektorid, millede summa võrdub vektordiagrammis üldpinge vektoriga, on vastavalt vooluga faasis, voolust 90° ees ja 90° järel, siis

$$\dot{U} = r\dot{I} + j\omega L\dot{I} - j\frac{1}{\omega C}\dot{I} = r\dot{I} + jx\dot{I} = \dot{I}Z$$

ehk

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z},$$

kus $Z = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = r + jx = z^{j\varphi}$ nimetatakse *kompleksseks takistuseks.*

g, L, C paralleelahela korral on üldvoolu ja pinge kompleksed efektiivväärtused seotud järgmiselt:

$$\dot{I} = g\dot{U} + \frac{1}{j\omega L}\dot{U} + j\omega C\dot{U} = g\dot{U} - jb\dot{U} = Y\dot{U},$$

kus $Z = r + j\frac{1}{j\omega L} + j\omega C = g - j\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right) = g - jb = ye^{-j\varphi}$

nimetatakse *kompleksseks juhtivuseks.* Sama üldpinge ja üldvoolu kompleksete efektiivväärtuste puhul järjestik- ja paralleelahelas

$$\frac{1}{Z} = Y \quad \text{ehk} \quad ZY = 1.$$

Järjestikahela korral väljendab avaldis $\dot{I} = \frac{\dot{E}}{Z}$ ehk $\dot{E} = \dot{I}\dot{Z}$ Ohmi seadust kompleksetele efektiivväärtustele, s. o. Ohmi seadust nn. sümboolses kujus, sest voolu ja emj. siinuselised hetkväärtused on asendatud teatud kompleksete sümbolitega. Ohmi seadus sümboolsel kujul seob voolu efektiivväärtuse ja algfaasi järjestikahela elektromotoorse jõu või, rakendatuna ahela osale, ahelaosa pinge efektiivväärtuse ja algfaasiga. Komplekssе takistuse või juhtivuse saame kõikide järjestikelementide takistuste või paralleelelementide juhtivuste aritmeetilisel liitmisel, kui ω asemel kirjutada $j\omega$.

Kuna Kirchhoffi seadused käsitlevad siinuselise olukorra puhul voolu- ja pingesiinuste algebralist summat, siis kehtivad ka Kirchhoffi seadused sümboolses kujus. Ahela sõlmega ühendatud harude voolude kompleksete efektiivväärtuste summa võrdub nulliga (Kirchhoffi I seadus):

$$\Sigma\dot{I} = 0.$$

Ahela kontuuris kõikide emj. allikate kompleksete efektiiv-

väärtuste summa võrdub pingelangude komplekssete efektiivväärtuste summaga (Kirchhoffi II seadus):

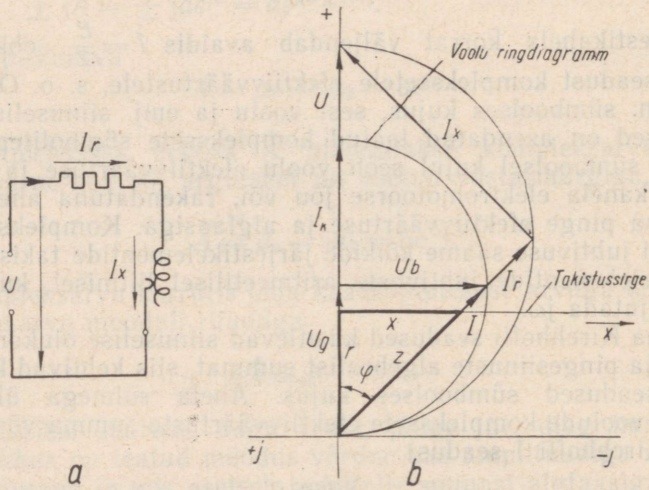
$$\sum \dot{E} = \sum \dot{I}Z.$$

Alalisvoolu puhul kasutatavad seosed kehtivad siinuselise voolu korral sümboolsel (komplekssel) kujul. Kirchhoffi seaduste rakendamisel märgitakse skeemile positiivsed (arvutuslikud) voolusuunad ja kasutatakse märke nii nagu arvutamisel alalisvoolu puhul.

Kahe haru «k» ja «m» või sama haru üksikute osade «k» ja «m» vaheline vastastikune induktiivsus M_{km} võetakse Kirchhoffi II seaduse rakendamisel arvesse komplekssse pingena $j\omega M_{km}\dot{I}_m$ — harus «k» ning $j\omega M_{km}\dot{I}_k$ — harus «m». Vastastikuse induktiivsuse märk oleneb muidugi ringkäigu suunast vaadeldavas harus «k» («m») ja arvutuslikust voolusuunast harus «m» («k»).

Soovides ahela võimsust määrata pinge komplekssse efektiivväärtuse $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$ ja voolu komplekssse efektiivväärtuse $\dot{I} = I_m e^{j\psi_i}$ korrutise kaudu, tuleb üks korrutatavatest võtta vastasmärgilise argumendiga, s. o. asendada kaaskomplekssse suurusega. Voolu kaaskomplekssse väärtuse puhul saame

$$\dot{U}\dot{I}^* = Ue^{j\psi_u}\, Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j\varphi} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi =$$
$$= I^2(r + jx) = P + jQ.$$

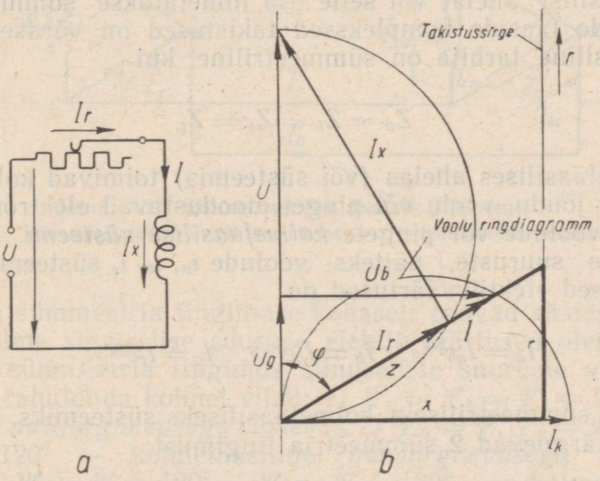


Joon. 0-29. Muutuva x ja konstantse r järjestikahel:
a — skeem, *b* — ringdiagrammid ja takistussirge

Pinge kompleksse efektiivväärtuse ja voolu kompleksse efektiivväärtuse kaaskompleksse suuruse korrutise reaalne osa võrdub aktiivvõimsusega P ja imaginaarne osa reaktiivvõimsusega Q.

Vahelduvvoolu elektrimasinate puhul esineb vajadus niisuguse r, L järjestikahela uurimiseks, milles kas r või x on laiades piirides muutuv. Konstantse r ja muutuva x ahela vektordiagramm on kujutatud joonisel 0-29. Pingevektori aktiivkomponendi $r\dot{I}$ ja reaktiivkomponendi $jx\dot{I}$ vaheline nurk on 90°. Mistahes reaktiivtakistuse x väärtuse puhul on nende komponentide summa konstantne vektor $\dot{U}$. Kuna ringjoone läbimõõdule toetuv nurk on 90°, siis pingevektori aktiivkomponendi lõpp-punkt ja reaktiivkomponendi alguspunkt asetsevad ringjoonel, mille läbimõõduks on toitepinge vektor U. Vooluvektori $\dot{I}$ otspunkti geomeetriliseks kohaks on ringjoon, mille läbimõõduks on lühisvool $\dot{I}_k = \frac{\dot{U}}{r}$. Seda ringjoont nimetatakse voolu ringdiagrammiks. Antud x väärtusele vastavalt võime määrata takistuskolmnurga kaudu faasinihke φ ja selle abil lõikepunktid ringjoontega. Takistuskolmnurga reaktiivtakistusele vastav kaatet (takistussirge) kantakse voolu ringdiagrammi kasutamise hõlbustamiseks -j suunas. Voolu aktiivkomponent $\dot{U}g$ on võrdeline aktiivvõimsusega P ja reaktiivkomponent $\dot{U}b$ reaktiivvõimsusega Q.

Konstantse x ja muutuva r ahela vektordiagramm on kujutatud joonisel 0-30. Pingevektori aktiivkomponendi $\dot{I}r$ lõpp-punkti ja



Joon. 0-30. Muutuva r ja konstantse x järjestikahel:
a — skeem, *b* — ringdiagrammid ja takistussirge

reaktiivkomponendi $j\dot{I}x$ alguspunkti geomeetriliseks kohaks on ringjoon, mille läbimõõduks on toitepinge vektor $\dot{U}$. Vooluvektori $\dot{I}$ otspunkti geomeetriliseks kohaks on ringjoon, mille läbimõõduks on lühisvoolu kompleksne efektiivväärtus $\dot{I}_k = \frac{\dot{U}}{jx}$. Lühisvoolu vektor on nihutatud 90° võrra pingevektorist $\dot{U}$ taha. Antud r väärtuse järgi võime määrata takistuskolmnurga kaudu nurga φ ja selle abil lõikepunktid ringjoontele. Voolu aktiivkomponent Ug on võrdeline aktiivvõimsusega P ja reaktiivkomponent Ub reaktiivvõimsusega Q.

0-9. KOLMEFAASILINE AHEL JA KOLMEFAASILINE VOOL

Kolme elektriahela kogumit nimetatakse *elektriahelate kolmefaasiliseks süsteemiks*, kui nendes elektriahelates toimivad sama elektromagnetilise energia allika kolm võrdse sagedusega (harilikult ka võrdse amplituudiga) elektromotoorset jõudu. Elektromotoorsete jõudude allikateks on nendes ahelates kas generaatori või transformaatori mähised. Üksikut ahelat süsteemis nimetatakse lühidalt *süsteemi faasiks* ja ahelate arvu süsteemis — süsteemi faaside arvuks. Joonisel 0-31, *a* on näidatud elektriliselt mittesidestatud kolmefaasiline ahelate süsteem. Tavaliselt ühendatakse kolmefaasilise süsteemi ahelad kas *tähtühendusse* (joon. 0-31, *b*) või *kolmnurkühendusse* (joon. 0-31, *c*). Sellisel viisil ühendatud kolme ahelaga süsteemi nimetatakse *kolmefaasiliseks ahelaks.* Kolmefaasilist ahelat või selle osa nimetatakse sümmeetriliseks, kui kõikide faaside komplekssed takistused on võrdsed. Näiteks kolmefaasiline tarbija on sümmeetriline, kui

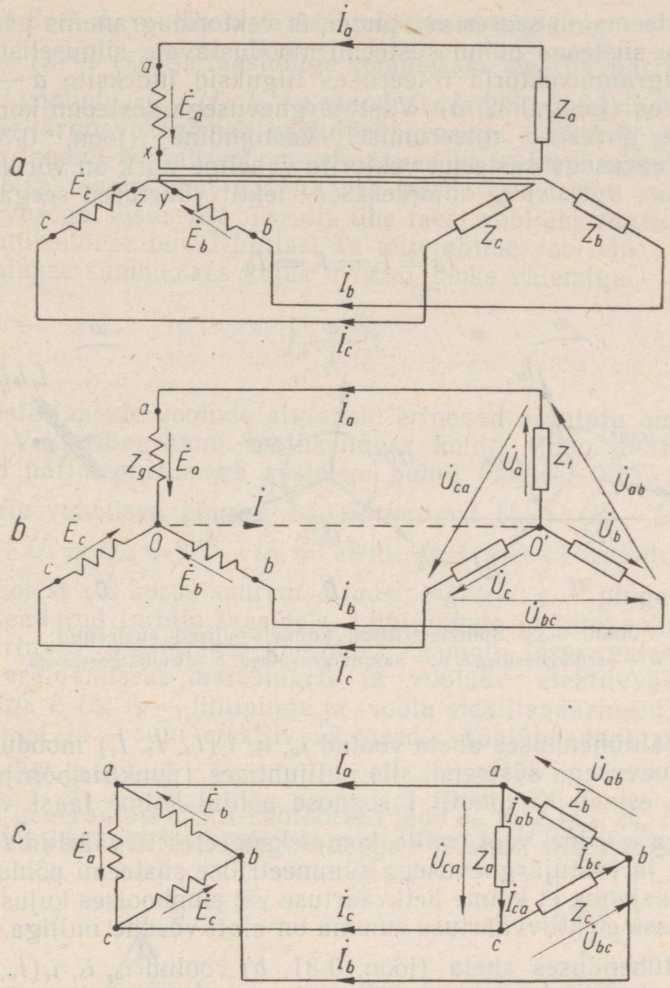
$$Z_a = Z_b = Z_c = Z_t.$$

Kolmefaasilises ahelas (või süsteemis) toimivad kolm elektromotoorset jõudu, voolu või pinget moodustavad elektromotoorsete jõudude, voolude või pingete *kolmefaasilise süsteemi.* Niisugust elektriliste suuruste, näiteks voolude i_a, i_b, i_c süsteemi, millede komplekssed efektiivväärtused on

$$\dot{I}_a = I_a e^{j\psi_a}, \quad \dot{I}_b = I_b e^{j\psi_b}, \quad \dot{I}_c = I_c e^{j\psi_c},$$

nimetame sümmeetriliseks kolmefaasiliseks süsteemiks, kui on täidetud alljärgnevad 2 sümmeetria tingimust:

1) $I_a = I_b = I_c = I$,
2) $\Psi_a - \Psi_b = \Psi_b - \Psi_c = \Psi_c - \Psi_a$.

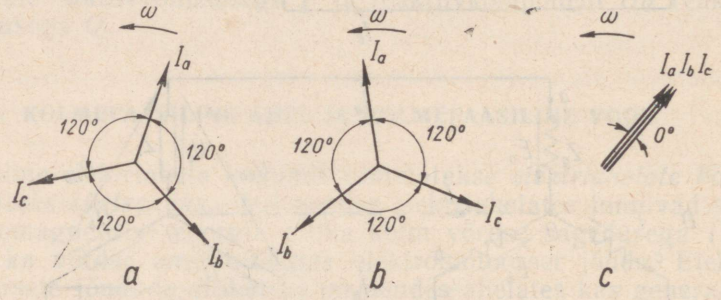


Joon. 0-31. Kolmefaasiline ahelate süsteem:
a — mittesidestatud, *b* — tähtühenduses ja *c* — kolmnurkühenduses

Esimese sümmeetria tingimuse kohaselt peavad süsteemi moodustava kolme siinuselise suuruse efektiivväärtused olema võrdsed. Teine sümmeetria tingimus siinuseliste suuruste algfaaside kohta võib rahulduda kolmel viisil: 1) $\Psi_a = \Psi_b = \Psi_c = \Psi$ — kolmefaasiline *nulljärgnevusega süsteem*; 2) $\Psi_a = \Psi$, $\Psi_b = \Psi - 120°$, $\Psi_c = \Psi + 120°$ — kolmefaasiline *pärijärgnevusega süsteem*; 3) $\Psi_a = \Psi$, $\Psi_b = \Psi + 120°$, $\Psi_c = \Psi - 120°$ — kolmefaasiline *vastujärgnevusega süsteem*. Nimetused «päri- ja vastujärgnevu-

sega süsteem» on seoses asjaoluga, et vektordiagrammis pärijärgnevusega süsteemi puhul süsteemi moodustavate siinuseliste suuruste diagrammvektorid roteerudes liiguksid indeksite $a - b - c$ järjekorras (joon. 0-32, *a*). Vastujärgnevusega süsteemi korral on indeksite järjekord roteerumisel vastupidine (joon. 0-32, *b*). Nulljärgnevusega süsteemi vektorite vaheline nurk on võrdne nulliga (joon. 0-32, *c*) ja kompleksed efektiivväärtused seega võrdsed:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c = \dot{I}_0.$$



Joon. 0-32. Sümmeetrilised kolmefaasilised süsteemid:
a — pärijärgnevusega, *b* — vastujärgnevusega, *c* — nulljärgnevusega

Kui tähtühenduses ahela voolud i_a, i_b, i_c ($\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$) moodustavad nulljärgnevusega süsteemi, siis nulljuhtmes (punktiirjoon joonisel 0-31, *b*) esineb Kirchhoffi I seaduse põhjal kolme faasi voolude summaga võrdne vool, mille kompleksne efektiivväärtus $\dot{I} = 3\dot{I}_0$.

Päri- ja vastujärgnevusega sümmeetrilise süsteemi põhiomaduseks on asjaolu, et kolme hetkväärtuse või sümboolses kujus kolme kompleksse efektiivväärtuse summa on alati võrdne nulliga. Seega kui tähtühenduses ahela (joon. 0-31, *b*) voolud i_a, i_b, i_c ($\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$) moodustavad päri- või vastujärgnevusega sümmeetrilise süsteemi, siis nulljuhtmes, milles Kirchhoffi I seaduse kohaselt esineb kolme faasi voolude summaga võrdne vool, tegelikult voolu ei ole ($\dot{I} = 0$). Sõlmede 0 ning 0′ vahel puudub sel puhul pinge (isegi nulljuhtme puudumisel). Sümmeetrilise ahela puhul saame siis Kirchhoffi II seaduse rakendamisel

$$\dot{E}_a = \dot{I}_a Z = \dot{U}_a + \dot{I}_a Z_g,$$
$$\dot{E}_b = \dot{I}_b Z = \dot{U}_b + \dot{I}_b Z_g,$$
$$\dot{E}_c = \dot{I}_c Z = \dot{U}_c + \dot{I}_c Z_g,$$

kus Z_g — generaatori faasi kompleksne takistus,

$Z = Z_t + Z_g$ — ahela faasi kompleksne takistus,

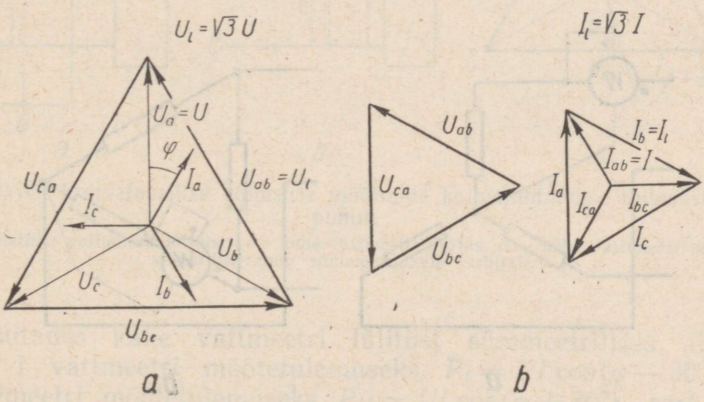
$\dot{U} = \dot{I}Z_t$ — tarbija faasipinge kompleksne efektiivväärtus.

Kui voolud i_a, i_b, i_c ($\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$) moodustavad sümmeetrilises ahelas kas pärijärgnevusega või vastujärgnevusega süsteemi, siis, nagu nähtub toodud avaldistest, moodustavad ka elektromotoorsed jõud ja tarbija faasipinged samuti kas pärijärgnevusega või vastujärgnevusega süsteemid. Tarbija ühe faasi vool ehk *faasivool*, mis on tähtühenduse puhul ühtlasi ka toitejuhtme vool ehk *liinivool*, arvutatakse sümboolses kujus a faasi jaoks valemiga

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_a}{Z}.$$

Teiste faaside voolude algfaasid erinevad arvutatu omast 120° võrra. Vektordiagramm tähtühenduse kohta (joon. 0-31, *b*) on toodud pärijärgnevusega süsteemi puhul joonisel 0-33, *a*. Toitejuhtmete vahelised pinged, nn. *liinipinged* $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b$, $\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c$ ja $\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a$ on efektiivväärtuse ja amplituudväärtuse poolest $\sqrt{3}$ korda suuremad *faasipingetest*, s. o. pingetest, mis on rakendatud tarbija faasidele. Liinipingete ja liinivoolude efektiivväärtused tähistatakse käesoleva raamatu järgnevates osades nende eraldamiseks faasipingete ja -voolude efektiivväärtustest indeksiga l: U_l; I_l — liinipinge ja -voolu efektiivväärtused, U, I — faasipinge ja -voolu efektiivväärtused. Tähtühenduse puhul on $U_l = \sqrt{3}U$ ja $I_l = I$.

Kui generaatori elektromotoorsed jõud e_a, e_b, e_c ($\dot{E}_a$, $\dot{E}_b$, $\dot{E}_c$) moodustavad päri- või vastujärgnevusega süsteemi, siis mähiste kolm-



Joon. 0-33. Pärijärgnevusega voolude ja pingete vektordiagrammid sümmeetrilisele ahelale, mille $Z = ze^{j30°}$, s. o. $\varphi = 30°$:
a — tähtühendus; *b* — kolmnurkühendus

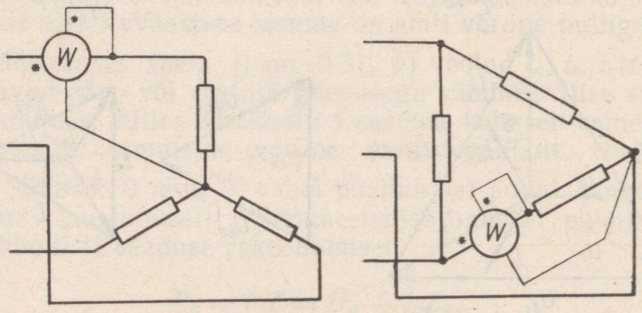
nurkühenduses (joon. 0-31, *c*) voolu tarbija puudumisel ei esine, sest kolme elektromotoorse jõu summa võrdub nulliga. Tarbija faasivoolude kompleksed väärtused $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$, $\dot{I}_{ca}$ on leitavad liinipingete või faasipingete (need on sel puhul võrdsed) jagamisel kompleksse takistustega. Kolmnurkühenduse puhul on liinivoolud efektiivväärtuselt faasivooludest $\sqrt{3}$ korda suuremad, s. o. $I_l = \sqrt{3}I$. Vektordiagramm kolmnurkühenduse vooludele ja pingetele on toodud joonisel 0-33, *b*. Jättes liinipinge muutmatuks ja ühendades tähtühenduses tarbija faasid kolmnurkühendusse, suurendame ühele tarbija faasile rakendatud pinget $\sqrt{3}$ korda. Liinivool suureneb samal ajal võrreldes tähtühendusega 3 korda. Tähtühenduses ja kolmnurkühenduses tarbijad on ekvivalentsed liinivoolu ja võimsuse mõttes, kui kolmnurkühenduses tarbija faasi kompleksne takistus Z_Δ on 3 korda suurem tähtühenduses tarbija faasi kompleksest takistusest Z_Y. Seega $Z_\Delta = 3Z_Y$.

Sümmeetriliste päri- või vastujärgnevusega voolude puhul sümmeetrilises kolmefaasilises ahelas on nii täht- kui ka kolmnurkühenduses näiv-, aktiiv- ja reaktiivvõimsus arvutatav seostega:

$$S = 3S_f = 3UI = \sqrt{3}U_l I_l,$$
$$P = 3P_f = 3UI\cos\varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi,$$
$$Q = 3Q_f = 3UI\sin\varphi = \sqrt{3}U_l I_l \sin\varphi,$$

kus φ — nurk faasipinge ja faasivoolu vektorite vahel.

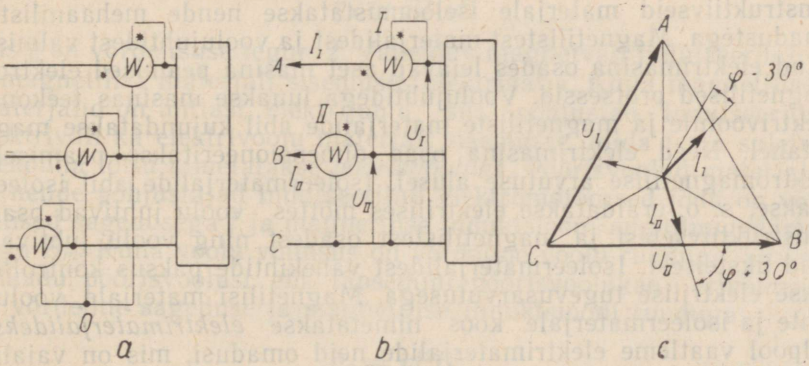
Nulljärgnevusega süsteemi puhul saab võimsust arvutada ainult faasipingete kaudu. Ühe faasi aktiivvõimsuse P_f mõõtmist näitab joon. 0-34.



Joon. 0-34. Kolmefaasilise ahela ühe faasi aktiivvõimsuse mõõtmine:
a — tähtühenduses, *b* — kolmnurkühenduses

Mittesümmeetrilise elektromotoorsete jõudude süsteemi puhul või mittesümmeetrilise kolmefaasilise ahela puhul on voolude ja pingete kolmefaasilised süsteemid mittesümmeetrilised. Iga mittesümmeetrilist süsteemi võib lahutada kolmeks sümmeetriliseks süsteemiks ehk *sümmeetriliseks komponendiks*: nulljärgnevusega süsteemiks, pärijärgnevusega süsteemiks ning vastujärgnevusega süsteemiks, millede summa võrdub mittesümmeetrilise lähtesüsteemiga. Mittesümmeetrilise ülesande lahendamisel osutub vajalikuks voolu- ja pingesüsteemi ning elektromotoorsete jõudude süsteemi lahutamine sümmeetrilisteks komponentideks, sest elektrimasinate takistused on eri järgnevusega voolude puhul erinevad. Sümmeetrilise ahela puhul on mistahes järgnevusega vool võrdeline sama järgnevusega pingega.

Mittesümmeetrilise olukorra puhul mõõdetakse kolmefaasiline võimsus kas üksikute faaside võimsustena, s. o. asetatakse lülitusse 3 vattmeetrit analoogiliselt vattmeetrile joonisel 0-34, või määratakse nulljuhtme puudumisel kolmefaasiline võimsus kolme vattmeetri tulemuste summana nn. *kunstliku nullpunkti lülituses* (joon. 0-35, *a*) või kahe vattmeetri tulemuste summana nn. *kahe vattmeetri lülituses* (joon. 0-35, *b*). Viimatinimetatud mõõtmisviisid eeldavad nulljuhtme puudumist.



Joon. 0-35. Kolmefaasilise võimsuse mõõtmine kolmejuhtmelise toitesüsteemi puhul:
a — kunstliku nullpunkti lülitus, *b* — kahe vattmeetri lülitus, *c* — kahe vattmeetri lülituse vektordiagramm sümmeetrilisele tarbijale

Kasutades kahe vattmeetri lülitust sümmeetrilises ahelas, saame I vattmeetri mõõtetulemuseks $P_I = UI\cos(\varphi - 30°)$ ja II vattmeetri mõõtetulemuseks $P_{II} = UI\cos(\varphi + 30°)$, sest nurgad vattmeetritele rakendatud liinipingete ja liinivoolude vahel on, nagu näha vektordiagrammist joonisel 0-35, *c*, vastavalt $\varphi - 30°$ ja $\varphi + 30°$. Mõõtetulemustest saame alljärgnevate valemite abil

sümmeetrilisele ahelale peale kolmefaasilise aktiivvõimsuse P ka kolmefaasilise reaktiivvõimsuse Q ning faasinihke φ:

$$P = P_I + P_{II} = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi,$$

$$Q = \sqrt{3}(P_I - P_{II}) = \sqrt{3}\, UI \sin \varphi,$$

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{\sqrt{3}(P_I - P_{II})}{P_I + P_{II}}.$$

0-10. ELEKTRIMASINAEHITUSES KASUTATAVATE ELEKTRIMATERJALIDE OMADUSI

Elektrimasinaehituses kasutatavad materjalid jaotuvad nende ülesannete järgi, mida täidavad nendest materjalidest valmistatud elektrimasina osad, *konstruktiivseteks materjalideks, magnetilisteks materjalideks* ja *voolujuhtideks* ning *isoleermaterjalideks*. Konstruktiivseid materjale kasutatakse niisuguste detailide ja osade valmistamiseks, mille peamiseks ülesandeks on mehaaniliste koormuste talumine — nende ülesandeks ei ole osa võtta elektromagnetilistest protsessidest masinas. Konstruktiivsed detailid dimensioneeritakse mehaanilise tugevusarvutuse alusel ning konstruktiivseid materjale iseloomustatakse nende mehaaniliste omadustega. Magnetilistest materjalidest ja voolujuhtidest valmistatud elektrimasina osades leiavad aset masina peamised elektromagnetilised protsessid. Voolujuhtidega luuakse masinas teekond elektrivoolule ja magnetiliste materjalide abil kujundatakse magnetahel. Need elektrimasina osad dimensioneeritakse peamiselt elektromagnetilise arvutuse alusel. Isoleermaterjalide abil isoleeritakse, s. o. eraldatakse elektrilises mõttes voolu juhtivad osad konstruktiivsetest ja magnetilistest osadest ning voolu juhtivad osad üksteisest. Isoleermaterjalidest vahekihtide paksus kontrollitakse elektrilise tugevusarvutusega. Magnetilisi materjale, voolujuhte ja isoleermaterjale koos nimetatakse *elektrimaterjalideks*. Allpool vaatleme elektrimaterjalide neid omadusi, mis on vajalikud elektromagnetilise arvutuse, elektrilise tugevusarvutuse ja elektrimasina kadude ning soojusliku arvutuse teostamisel. Elektrimasina soojuslik arvutus on vajalik esmajoones masinas kasutatud isoleermaterjalide seisukohalt, sest need kaotavad oma isoleerivad omadused temperatuuri tõusuga ja on ise sageli halbadeks soojusjuhtideks, millega nad takistavad kadudest tingitud soojuse eemaldamist masinast.

Magnetilistest materjalidest omavad elektrimasinaehituses peamist tähtsust elektrotehniline terasplekk, valatud teras ja malm. Nende materjalide elektromagnetilisteks iseloomustajateks on magnetilise induktsiooni B sõltuvus magnetvälja tuge-

vusest H, s. o. $B = f(H)$, ning nn. erirauaskao p_{Fe} sõltuvus magnetilisest induktsioonist B ja sagedusest f, s. o. $p_{Fe} = f(B, f)$.

Erirauaskao p_{Fe} all mõeldakse vahelduvas magnetväljas asetsevas magnetilises materjalis soojuseks muunduvat võimsust magnetilise materjali ühe kaaluühiku kohta. Erirauaskao ühikuks on vatti kilogrammile (W/kG). Erirauaskao all mõeldakse õieti rauaskao võimsust materjali kaaluühiku kohta, seega täpsemini rauaskao erivõimsust.

Vahelduvas magnetväljas asetsevas (ferro-) magnetilises materjalis tekib soojust kahel põhjusel. 1. Materjali ümbermagneetimise iga tsükli jooksul kulutatakse teatud energia sisemisele hõõrdumisele materjalis, mille tõttu tekib nn. hilistumis- ehk hüstereesinähtus (vaata p. 0-1). Hüstereesisilmuse pindala on võrdeline materjalis ühe ruumi- või ka kaaluühiku kohta ümbermagneetimise ühe tsükli jooksul soojuseks muunduva energiaga. Hüstereesikadu ühes ajaühikus materjali kaaluühiku kohta, s. o. erikadu hüstereesist ehk täpsemini hüstereesikao erivõimsus p_h on võrdeline sagedusega (tsüklite arvuga sekundis) f, ning elektrimasinaehituses kasutatavate induktsioonide puhul võrdeline ligikaudu ka magnetilise induktsiooni maksimaalväärtuse ruuduga B_m^2. Seega erikadu hüstereesist

$$p_h \approx \xi f B_m^2,$$

kus ξ on võrdelisuse tegur. 2. Vahelduv magnetväli indutseerib ferromagnetilise materjali sisemuses elektrivälja. Kuna magnetilised materjalid on ühtlasi elektrijuhid, siis põhjustab indutseeritud elektriväli ka elektrivoolu materjali sisemusse, mida tema suletud teekonna tõttu nimetatakse *pöörisvooluks*. Pöörisvoolud materjalis ja nende põhjustajad indutseeritud elektromotoorsed jõud on võrdelised sagedusega f ja magnetilise induktsiooni amplituudväärtusega B_m. Kuna voolu võimsus on võrdeline voolu ruuduga, siis on erikadu pöörisvoolust ehk täpsemini pöörisvoolukao erivõimsus p_p võrdeline sageduse ja magnetilise induktsiooni ruuduga:

$$p_p = \eta f^2 B^2,$$

kus η on võrdelisuse tegur.

Erirauaskadu võrdub hüstereesist ja pöörisvoolust tingitud erikadude summaga:

$$p_{Fe} = p_h + p_p = (\xi f + \eta f^2) B_m^2.$$

Konstantse sageduse (näiteks $f = 50$ Hz) puhul on erirauaskadu võrdeline magnetilise induktsiooni ruuduga:

$$p_{Fe} = k B_m^2.$$

Teades erirauaskadu p_{Fe1} magnetilise induktsiooni B_{m1} juures,

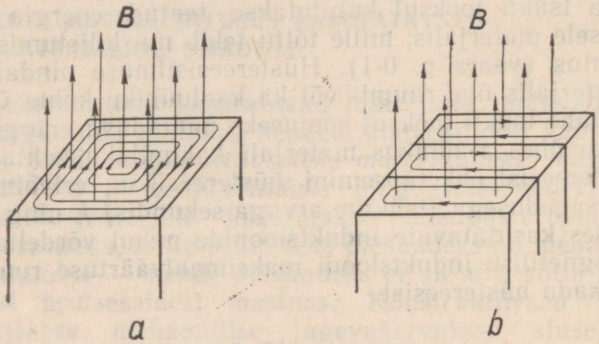
TARTU ÜLIKOOLI RAAMATUKOGU

võime määrata erirauaskao p_{Fe2} induktsiooni B_{m2} juures induktsioonide suhte abil:

$$p_{Fe2} = p_{Fe1}\left(\frac{B_{m2}}{B_{m1}}\right)^2.$$

Elektrimasina teatud osa rauaskao (võimsuse) P_{Fe} W leiame erirauaskao p_{Fe} ja vastava osa kaalu G kG korrutisena:

$$P_{Fe} = p_{Fe}G \text{ W}.$$



Joon. 0-36. Magnetilise induktsiooni väärtuse suurenemisel magnetahela ristlõikes tekkivad pöörisvoolud:
a — massiivse magnetahela puhul, *b* — üksteisest isoleeritud plekkidest laotud magnetahela puhul

Rauaskao vähendamiseks koostatakse magnetahel vahelduvvälja puhul üksteisest laki või paberi abil elektriliselt isoleeritud plekkidest. Sel puhul ei saa moodustuda tervet magnetahela ristlõiget haaravaid pöörisvoolusid, vaid pöörisvoolud indutseeritakse ainult üksikute plekkide piirides (joon. 0-36), mille tõttu erirauaskadu ja rauaskadu vähenevad olulisel määral. Elektrotehnilise terase erirauaskadu väheneb veel terasele sulas olekus räni (Si) lisamisega.

Elektrotehnilist nn. legeeritud terasplekki iseloomustab räni kaaluline protsent terase koosseisus. Ränilisand suurendab terase elektrieritakistust ja vähendab seega pöörisvoolusid ning pöörisvoolukao ja erirauaskao väärtust. Ränisisaldus üle 1,8% suurendab märgatavalt terase magnetilist läbitavust nõrkade väljade puhul, kuid vähendab tugevate väljade puhul. Räni vähendab samuti terase vananemist, mis seisab erirauaskao suurenemises aja jooksul, kuid samal ajal ta halvendab terase mehaanilisi omadusi. Teras muutub kõvemaks ning rabedamaks ja seega raskemini töödeldatavaks. Terase erikaal väheneb 4% ränilisandi puhul 7,8-lt 7,55 G/cm^3.

Viimasel ajal kasutatakse kuumaltvaltsitud teraspleki kõrval transformaatorite ja ka roteeruvate elektrimasinate ehituses külmaltvaltsitud terasplekki. Viimase magnetilised omadused on pleki valtsimise suunas tunduvalt paremad tavalise terasplekiga võrreldes.

Elektrimasinaehituses kasutatakse peamiselt järgmisi riiklikule standardile ГОСТ 802-54 vastavaid terase marke: Э11, Э12; Э21; Э31, Э310, Э320, Э330; Э41, Э42, Э43. Siin on margi tähisel järgmine sisu: Э algustäht sõnast электротехническая — elektrotehniline (teras); esimene number Э järel tähistab terase legeerimise astet; teine number tähistab terase erikadu ja kolmanda numbriga 0 märgitakse külmaltvaltsitud terast. Legeerimise astet tähistavad numbrid vastavad järgmistele ränisisaldustele: 1 — 0,8 kuni 1,8%; 2 — 1,8 kuni 2,8%; 3 — 2,8 kuni 4%, kui teras on kuumalt valtsitud ja 2,5 kuni 3,5%, kui teras on külmalt valtsitud; 4 — 4 kuni 4,8%. Terase erikadu tähistavatel numbritel on järgmine sisu: 1 — normaalse erirauaskaoga, 2 — vähendatud erirauaskaoga, 3 — väikese erirauaskaoga teras. Näiteks Э310 on külmaltvaltsitud normaalse erirauaskaoga elektrotehniline teras, mille ränisisaldus on piirides 2,5 kuni 3,5%.

Elektrotehnilise teraspleki paksus on harilikult 0,50 või 0,35 mm. Terasplekki Э11 valmistatakse ka paksusega 1,0 mm. Elektrimasinate jaoks, mis töötavad kõrgendatud sagedusega, valmistatakse 0,20, 0,15 ja 0,10 mm paksust plekki.

Kirjeldatud elektrotehniliste teraste kohta on magnetilise induktsiooni ja magnetvälja tugevuse sõltuvus ning erirauaskao väärtused toodud tabelis 0-2. Magnetilise induktsiooni sümboli B indeks näitab magnetvälja tugevust H, mille puhul terase magnetiline induktsioon peab omama standardi kohaselt vähemalt tabelis toodud väärtust. Magnetilise induktsiooni ühikuks tabelis on Wb/m^2 (10^4 gaussi) ja magnetvälja tugevuse ühikuks A/cm (100 A/m). Näiteks B_{25} on magnetiline induktsioon magnetvälja tugevuse $H = 25$ A/cm puhul. Erirauaskao sümboli p indeksina esineva murru lugeja 1,0, 1,5 või 1,7 tähistab magnetilise induktsiooni amplituudi ja murru nimetaja sagedust, mille juures on erirauaskadu määratud. Seega $p_{1,50/50}$ on erirauaskadu magnetilise induktsiooni amplituudi $B_m = 1{,}5$ Wb/m^2 ja sageduse $f = 50$ Hz puhul.

Voolujuhtidest omab elektrimasinaehituses peamist tähtsust vask, mõningal määral ka alumiinium.

Vase peamiseks eeliseks teiste metallide ees on tema suur erijuhtivus. Vase erijuhtivus on üle 1,5 korra suurem alumiiniumi ja üle 7 korra suurem raua erijuhtivusest. Ainult hõbe omab umbes 10% võrra vasest suuremat erijuhtivust. Vase erijuhtivus on 15° C juures 57 $m/\Omega\ mm^2$, seega eritakistus $\frac{1}{57} = 0{,}0175\ \Omega\ mm^2/m$. Vase eritakistus temperatuuril t °C on leitav valemiga

Tabel 0-2

Elektrotehniliste teraste magnetiline induktsioon ja erirauaskadu

Terase mark	Pleki nimipaksus mm	Magnetiline induktsioon Wb m^2 magnetvälja tugevuse puhul A/cm					Erirauaskadu W/kG		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	$p_{1,7/50}$
		mitte vähem kui					mitte rohkem kui		
Э11	1,0	—	1,50	1,62	1,75	1,97	5,80	13,4	—
Э11	0,50	—	1,50	1,62	1,75	1,97	3,30	7,90	—
Э12	0,50	—	1,49	1,61	1,74	1,96	2,80	6,80	—
Э21	0,50	—	1,48	1,59	1,73	1,94	2,50	6,10	—
Э31	0,50	—	1,46	1,57	1,70	1,90	2,00	4,50	—
Э31	0,35	—	1,46	1,57	1,70	1,90	1,60	3,60	—
Э41	0,50	1,30	1,45	1,56	1,68	1,88	1,60	3,60	—
Э42	0,50	1,29	1,44	1,55	1,67	1,87	1,40	3,20	—
Э43	0,50	1,28	1,43	1,54	1 66	1,87	1,25	2,90	—
Э41	0,35	1,30	1,45	1,56	1 68	1,88	1,35	3,20	—
Э42	0,35	1,29	1,44	1,55	1,67	1,87	1,20	2,80	—
Э43	0,35	1,28	1,43	1,54	1,66	1,87	1,05	2,50	—
Э310	0,50	1,57	1,70	1,80	1,90	1,98	1,25	2,80	3,80
Э320	0,50	1,65	1,80	1,87	1,92	2,00	1,15	2,50	3,50
Э330	0,50	1,70	1,85	1,90	1,95	2,00	1,05	2,30	3,20
Э310	0,35	1,57	1,70	1,80	1 90	1,93	1,00	2,20	3,20
Э320	0,35	1,65	1,80	1,87	1,92	2,00	0,90	1,90	2,90
Э330	0,35	1,70	1,85	1,90	1,95	2,00	0,80	1,70	2,60

$$\varrho_{Cu} = 0{,}0175 \frac{235 + t}{235 + 15}.$$

Vase erikaal on 8,89 G/cm^3.

Alumiiniumi eritakistus on 15° C juures $\frac{1}{36} = 0{,}028$ Ωmm^2/m ja temperatuuril t° C

$$\varrho_{Al} = 0{,}028 \frac{245 + t}{245 + 15}.$$

Alumiiniumi erikaal on kõigest 2,7 G/cm^3.

Elektrimasina mähiste isolatsiooni tuleb vaadelda kui elektrimasina põhilist konstruktsiooniosa. Mähiste isolatsioonist sõltuvad masina tehnilis-majanduslikud omadused, sest isolatsiooni paksus mõjutab oluliselt elektrimasina mõõtmeid ja kaalu. Mähise isolatsioonina kasutatud materjalide soojuskindlus määrab masinas lubatavad temperatuurid, seega masina lubatava elektromagnetilise koormuse. Suurt tähtsust omab muidugi ka isolatsiooni soojusjuhtivus, tema niiskuskindlus ja keemiline vastupidavus. Peale selle peab isolatsioon omama küllaldast mehaanilist tugevust. Elektrimasina tööea määrab tema isolatsiooni tööiga. Isoleermaterjali tööeale on määrava tähtsusega tema temperatuur, sest isoleermaterjali soojenemisel toimuvad temas niisugused füüsikalised ja keemilised protsessid, mille tulemusel aja jooksul kaovad materjali isoleerivad omadused ja mehaaniline tugevus. Seepärast ongi elektrimasina isolatsiooni klassifikatsiooni aluseks tema soojuskindlus.

Isolatsiooniklassi *A*, mille kestev lubatud temperatuur on 105° C, kuuluvad puuvill, siid, nendest kangad ja lindid, tselluloospaber ja kartongid ning teised taolised ained, mis on immutatud õli või lakiga või siis asetsevad õlis. Lakis immutatud riide või paberi puhul kõneleme lakkriidest või lakkpaberist. Siia klassi kuulub ka juhtmete isolatsioonina kasutatav email.

Isolatsiooniklassi *B*, mille kestev lubatav temperatuur on 130° C, kuuluvad materjalid, mis on valmistatud anorgaanilistest dielektrikutest, nagu vilgukivilehekestest (mikaniit, mikafoolium, mikalint jne.), asbestkiust ja klaaskiudainest (klaaslakkriie), kusjuures side- ning immutusaineks on kasutatud orgaanilisi lakkisid ja vaikusid.

Isolatsiooniklass *AB* on klasside *A* ja *B* vahepealne, kestva lubatava temperatuuriga 120° C.

Isolatsiooniklassi *BC*, mille lubatav kestev temperatuur on 155° C, kuuluvad samad ained mis klassi *B*, kuid sidumiseks ja immutamiseks kasutatud orgaanilised lakid ja vaigud on modifitseeritud räniorgaaniliste ainetega. Isolatsiooniklassi *CB*, mille lubatav kestev temperatuur on 180° C, kuuluvad samad ained, kuid ilma orgaaniliste side- ja immutusaineteta. Sideaineks ja immutusaineks kasutatakse räniorgaanilisi lakkisid ja vaikusid.

Isolatsiooniklassi *C* kuuluvad vilgukivi, klaas, räni, keraamilised materjalid. Lubatav kestev temperatuur on üle 180° C.

Eriti tähtsat kohta elektriisoleermaterjalide seas omavad *vaigud* ja nende lahused — lakid. Looduslike vaikudega (šellak, merevaik) võrreldes on tehisvaikude osatähtsus elektrimasinaehituses tänapäeval kaugelt suurem. Väga laialdast kasutamist on leidnud vinüülvaikudest isoleermaterjalid ja -detailid: polüvinüülkloriidtorud, vinüplastist lehed, polüstüroolist ja polüetüleenist kiled, vinüfleksist ja metallviinist juhtmeemailid jne. Eriti vastupidavad on isoleerkiled ja lehed tehismaterjalidest ftoroplast 4 (klass *C*)

ja ftoroplast 3 (klass *B*) keemilisele mõjule ning tehismaterjalist lavsaan (klass *AB*) mehaanilisele koormusele. Samuti on tunnustust võitnud polüamiidvaigust tehiskiudaine kaproon.

Paljud tahked isoleerdetailid valmistatakse elektrimasinaehituses tänapäeval plastmassist, peamiselt bakeliidist. Oluline koht on samuti kihilistel plastmassidel getinaksil ja tekstoliidil. Getinaks on bakeliitvaigus immutatud ja kuumalt kokkupressitud (bakeliseeritud) paber, tekstoliit aga riie. Kuumuskindla plastmassi mikaleksi (klass *C*) puhul on täidisaineks vilgukivipulber ja sideaineks klaas.

Isolatsioonist õhukihtide ja -tühemikkude eemaldamiseks immutatakse terve mähis või üksikud isoleermaterjalid kas otsese kastmisega lakisse või asfalti või siis kastmisega peale mitmetunnist kuumutamist vaakuumis. Viimasel menetlusel, nn. *kompaundimisel* täidab asfalt või eriline kompaundmass kõik õhuvahed isolatsioonis ja mähis moodustab monoliitse terviku. Muidugi esitatakse lakkidele ja kompaundidele samasugused nõuded soojuskindluse seisukohalt kui muudelegi isoleermaterjalidele.

Elektrilisest seisukohast iseloomustab isoleermaterjali suhteline dielektriline läbitavus ε_r ja elektriline tugevus ehk nn. *läbilöögitugevus*, s. o. elektrivälja tugevus kV/cm, mille juures materjal kaotab oma isoleerivad omadused ja temas tekib elektriline läbilöök. Elektrilise läbilöögi puhul toimub aine mehaaniline purunemine. Tahkesse dielektrikusse tekib auk ja tema isoleeriv võime kaob. Vedela ja gaasilise dielektriku puhul uuel pingestamisel isoleeriv võime taastub.

Transformaatori mähiste isoleerimiseks ja paremaks jahutamiseks kasutatakse vedelat dielektrikut, nn. transformaatoriõli. Transformaatoriõli peab omama kõrget elektrilist tugevust, mis sõltub suurel määral õli niiskusesisaldusest ja puhtusest.

Tähtsaks elemendiks masina isolatsioonis on *juhtmeisolatsioon*. Juhtmeisolatsiooniks kasutatakse elektrimasinaehituses tänapäeval väga mitmesuguseid materjale. Levinumaks juhtmeisolatsiooniks oli kuni viimase ajani puuvillmähis või -punutis. Puuvilla eelisteks on küllaldane mehaaniline tugevus ja madal hind. Tema puuduseks on aga suur paksus ja hügroskoopsus. Viimase tõttu tuleb puuvillisolatsiooni tingimata immutada. Puuvillisolatsiooni kasutamine on normaalmasinate juures tavaline. Siidisolatsiooni kasutamist piirab tema kõrge hind. Viimasel ajal suurt levikut leidnud emailisolatsioon omab kõikide teiste isoleermaterjalidega võrreldes vähimat paksust ja suurimat elektrilist tugevust. Emailisolatsiooniga juhtmeid valmistatakse lakikindlatena ja soojuskindlatena. Neid juhtmeid kasutatakse väikese võimsusega elektrimasinates. Emailisolatsiooni puuduseks on väike mehaaniline tugevus. Suurema mehaanilise tugevuse saavutamiseks varustatakse emailisolatsiooniga juhe ka siid- või puuvillisolatsiooniga. Suuremat soojuskindlust omavad nn. deltaasbestist ja klaaskiudainest isolat-

sioonid. Nende puuduseks on väike mehaaniline tugevus ja deltaasbestisolatsioonil veel lisaks suur paksus. Viimastel aastatel on leidnud laialdast kasutamist emailitüübiline isolatsioon vinifleks ja metallviin, mille eelisteks on: suur mehaaniline tugevus ja elastsus, väike hüdroskoopsus, suurem soojuskindlus ja soojusjuhtivus, hea keemiline vastupidavus (ei lahustu bensiinis, piirituses jne.) ning kõrge elektriline tugevus. Peamiste isoleeritud vaskjuhtmete margid ja omadused on toodud tabelis 0-3. Samas on antud ka margi tähiste seletused.

Tabel 0-3

Isoleeritud vaskjuhtmete marke

Juhtme mark	Juhtme iseloomustus ja margi tähendus
ПБО	Vaskjuhe (П — провод), isoleeritud puuvillmähise ühe kihiga (БО — хлопчатобумажная обмотка)
ПБД	Vaskjuhe, isoleeritud puuvillmähise kahe kihiga (БД — хлопчатобумажная, двойная)
ПШО	Vaskjuhe, isoleeritud siidimähise ühe kihiga (ШО — шелковая обмотка)
ПБОО	Vaskjuhe, isoleeritud puuvillmähise ühe kihiga ja puuvillpunutisega (О — оплетка)
ПЭЛ	Vaskjuhe, isoleeritud lakikindla emailiga (ЭЛ — эмаль, лакостойкая)
ПЭЛШО	Vaskjuhe, ümar, isoleeritud emailiga ja siidimähise ühe kihiga; klass *A*
ПЭЛШКО	Sama mis eelmine, kuid kaproonsiidiga (ШК — шелк капрон)
ПКД	Vaskjuhe, ümar või kandiline, isoleeritud kaproonmähise kahe kihiga
ПЭВ-1 ПЭВ-2	Vaskjuhe, ümar, isoleeritud vastupidava emailiga ja ühekihilise (1) või kahekihilise (2) vinüfleksiga (В — винифлекс); lähedane klassile *AB*
ПЭВП ПДА	Sama mis eelmine, kuid kandiline (П — прямоугольный) vaskjuhe, ümar või kandiline deltaasbestisolatsiooniga (ДА — дельта-асбест); klass *B*
ПСД	Vaskjuhe, ümar või kandiline, isoleeritud klaasvilla (С — стекло-волокно) kahe kihiga; klass *BC*
ПЭТ	Vaskjuhe, ümar või kandiline, isoleeritud temperatuurikindla (Т) ja lakikindla emailiga; klass *B*
ПЭТСО	Sama mis eelmine, kuid isoleeritud lisaks klaaskiudainest ühekihilise mähisega
ПЭТКСО	Sama mis eelmine, kuid räniorgaanilise emailiga (К — кремний-органический); klass *BC*
ПЭТК	Sama mis ПЭТ, kuid räniorgaanilise lakiga; klass *BC*
ПСДК	Sama mis ПСД, kuid immutatud räniorgaanilise lakiga; klass *CB*

ALALISVOOLUMASINAD

I PEATÜKK

ALALISVOOLUMASINATE TÖÖTAMISPÕHIMÕTE JA EHITUS

1-1. ALALISVOOLUMASINA TÖÖTAMISPÕHIMÕTE

Elektrotehnika arenemise algaastail tunti ainult alalisvoolu, mida saadi galvaanilistest elementidest. Seepärast algab elektrimasinate areng küllalt keeruka ehitusega alalisvoolumasinatest ja alles palju hiljem võeti kasutusele ja arendati välja lihtsamad vahelduvvoolumasinad.

Alustades alalisvoolumasina tundmaõppimist, tuleb meenutada, et iga elektrimasina töötamise aluseks on kaks tähtsaimat elektrotehnilist põhimõtet: elektromagnetilise induktsiooni seadus ja nähtus, et magnetvälja viidud vooluga juhtmele mõjub mehaaniline jõud.

Eelnimetatud põhimõtetest lähtudes on igas elektrimasinas kaks põhilist osa: *induktor* ja *ankur*. Induktoris tekitatakse magnetväli. Ankrut välise mehaanilise jõuga liikuma pannes indutseeritakse ankru mähise juhtmetes elektromotoorne jõud. Välise elektrivooluallika abil ankru juhtmetes voolu tekitades mõjuvad neile juhtmeile mehaanilised jõud.

Generaator. Selgitame nüüd generaatori töötamist põhimõttelise ehitusskeemi alusel. Olgu kahe liikumatu erinimelise magnetpooluse vahel (joon. 1-1) tekitatud alaline magnetvoog. Nimetatud kahe pooluse vahel pöörelgu generaatori ankru mähise üks juhtmekeerd. Selle keeru algus ja lõpp olgu ühendatud ankru võllile liikumatult kinnitatud kahe kontaktrõnga külge. Ankur pannakse pöörlema mingi välise mehaanilise jõumasina (näit. auruturbiini) poolt. Generaatorist saadava elektrienergia juhtimiseks vooluahela välisesse ossa (tarbijatele) on kontaktrõngastega kokkupuutes liikumatud harjad. Harjad on prismakujulised kehad, mis on valmistatud retortsöe, grafiidi ja vase segust.

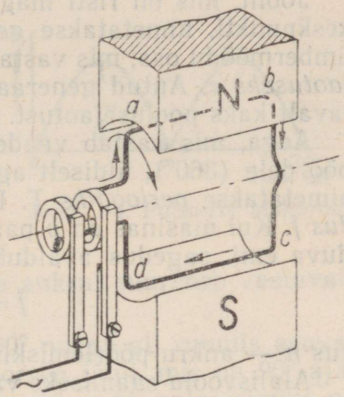
Pöörelgu ankur konstantse pöörlemiskiirusega n joonisel näidatud suunas. Siis indutseeritakse ankrul asuva keeru külgedes *ab* ja *cd* elektromotoorne jõud. Emj. suuna leiame parema käe reegli abil. Vastavalt sellele ongi joonisele 1-1 märgitud keeru külgedes tekkiva emj. suund.

Joonisel 1-1 näidatud ankru keeru külgede diametraalse asendi korral summeeruvad keeru külgedes indutseeritud elektromotoorsed jõud.

Harjade külge ühendatud elektrienergia tarbijat läbib seega generaatori mähise keerus indutseeritud emj. suunaga ühtiv elektrivool.

Emj. hetkväärtuse määrame valemist

$$e = Blv \text{ V}, \qquad (1\text{-}1)$$



Joon. 1-1. Generaatori skeem

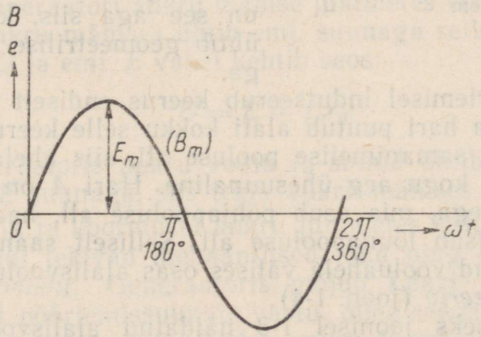
kus B — magnetiline induktsioon kohas, kus parajasti asub juhe, V sec/m^2,

l — juhtme aktiivse osa pikkus, s. o. juhtme selle osa pikkus, mis lõikab väljajooni, m,

v — juhtme liikumise kiirus magnetvälja suhtes m/sec.

Kuna oletasime, et ankur pöörleb konstantse kiirusega ja juhtme pikkus on antud generaatoris samuti muutumatu, siis sõltub emj. hetkväärtuse ajaline muutumine magnetvoo ruumilisest jaotusest õhupilus pooluste kohal, seal kus liigub juhe.

Jälgides emj. suunda keeru küljes *ab* tema pöörlemisel magnetväljas, selgub, et emj. suund temas muutub sõltuvalt sellest, millise pooluse all asub külg *ab*. Emj. suund põhjapooluse all on vastupidine emj. suunale lõunapooluse all. Seega indutseerub keeru küljes *ab* ja samuti küljes *cd* vahelduv emj., kusjuures keeru külgedes indutseeritud elektromotoorsed jõud igal hetkel liituvad. Kui magnetilise induktsiooni jaotus pooluse all on siinuseline, siis ka tekkiv vahelduv emj. on siinuseline (joon. 1-2). Ahela välises osas tekib vahelduva emj. mõjul vahelduvvool.



Joon. 1-2. Generaatori mähise juhtmeis indutseeritav siinuseline elektromotoorne jõud

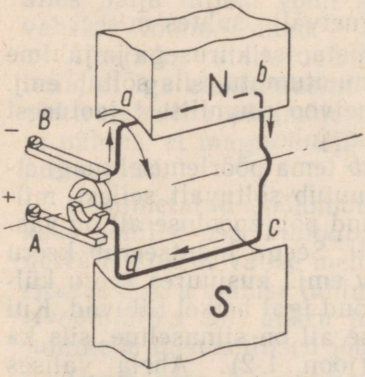
Joont, mis on risti magnetvoo suunaga ankrus ja läbib ankru keskpunkti, nimetatakse *geomeetriliseks neutraaljooneks.* Ankru ümbermõõdu osa, mis vastab ühele poolusele, nimetatakse *poolusejaotuseks* τ. Antud generaatoris on põhja- ja lõunapoolusele vastavalt kaks poolusejaotust.

Aega, mis vastab vaadeldavas generaatoris ankru ühele täispöördele (360°), üldiselt aga vahelduva emj. täielikule muutusele, nimetatakse *perioodiks T*. Perioodide arv ühes sekundis on *sagedus f*. Kui masinas on p paari pooluseid, siis indutseeritava vahelduva emj. sagedus avaldub valemiga

$$f = \frac{pn}{60}, \qquad (1\text{-}2)$$

kus n — ankru pöörlemiskiirus p/min.

Alalisvoolu saamiseks varustatakse eespoolkirjeldatud generaator kontaktrõngaste asemel *kommutaatoriga.* Kommutaatori ülesandeks on vahelduvvoolu alaldamine. Tema põhimõttelist ehitust näeme joonisel 1-3. Ankru võllile on kinnitatud kahe kontaktrõnga asemel kaks vasksegmenti, mis on ankrust ja teineteisest isoleeritud. Nende segmentidega ehk kommutaatori *lestadega (lamellidega)* on ühendatud ankrul asuva juhtme keeru otsad. Kommutaatori lestade vastu puutuvad liikumatud harjad ning viimaste külge on ühendatud vooluahela väline osa (tarbija).



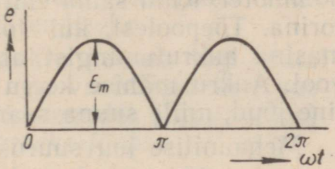
Joon. 1-3. Alalisvoolugeneraatori skeem

Harjade asend kommutaatoril on olulise tähtsusega. Harjad peavad asuma kommutaatoril niisuguses asendis, et üleminekul ühelt lestalt teisele emj. keerus on parajasti võrdne nulliga. Nii on see aga siis, kui keeru pind ühtib geomeetrilise neutraaljoonega.

Ankru pöörlemisel indutseerub keerus endiselt vahelduv emj. Kuna nüüd iga hari puutub alati kokku selle keeru küljega, mis asub vastavalt samanimelise pooluse all, siis ahela välises osas tekkiv vool on kogu aeg ühesuunaline. Hari *A* on alati ühenduses keeru küljega, mis asub põhjapooluse all, hari *B* vastavalt küljega, mis asub lõunapooluse all. Selliselt saame generaatori külge ühendatud vooluahela välises osas alalisvoolu. Saadav alalisvool on *pulseeriv* (joon. 1-4).

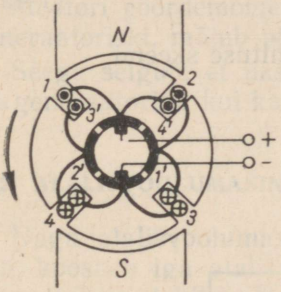
Võttes aluseks joonisel 1-3 näidatud alalisvoolugeneraatori pöörlemissuuna ning indutseeritud emj. ja voolu suuna ahela välises osas, loeme harja *A* positiivseks ja harja *B* negatiivseks.

Antud juhul voolu ja emj. pulseerimine on tunduv, sest muutumine toimub nullist kuni maksimaalväärtuseni. Selline tunduvalt pulseeriv alalisvool ei ole enamasti kasutatav. Seepärast püütakse vähendada pulseerimise ulatust. Seda on võimalik saavutada, asetades ankrule mitu, ruumiliselt üksteise suhtes nihutatud keerdu. Keerdude arvu suurendamisega ankrul suureneb vastavalt ka lestade arv kommutaatoril.

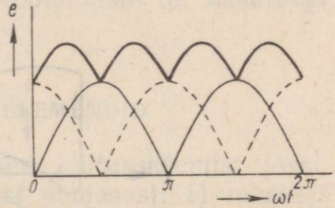


Joon. 1-4. Pulseeriv alalisvool

Kui näiteks asetada ankrule kaks 90° nurga all ruumis asuvat keerdu (joon. 1-5), saame elektromotoorsed jõud, mis on 90° ajaliselt üksteise suhtes nihutatud. Resulteeriva emj. pulseerimine on niisugusel juhul palju väiksem (joon. 1-6).



Joon. 1-5. Nelja juhtmekeeruga ankrumähis



Joon. 1-6. Pulseeriv alalisvool kahe keeruga ankrumähise puhul

Kui generaator ühendada vooluahela välise osaga (tarbijatega), tekib generaatori ankru mähise juhtmetes vool. Voolu suund generaatori ankru mähises ühtib emj. suunaga selles. Generaatori klemmipinge U ja emj. E vahel kehtib seos:

$$U = E - I_a r_a. \qquad (1\text{-}3)$$

Kuna generaatoris ankru voolu I_a suund ühtib ankrus indutseeritud emj. E suunaga, siis tekib ankru mähises pingelang $I_a r_a$.

Magnetvälja ja koormusel ankru juhtmetes kulgeva voolu vastastikusel mõjul tekivad mehaanilised jõud ning *elektromagnetiline pöördemoment*. Generaatoris mõjub Lenzi juhise kohaselt pöördemoment pöörlemissuunale vastu, olles seega pidurdav. Selles võib kergesti veenduda, leides ankru juhtmetele mõjuva jõu suuna vasaku käe juhise abil.

Mootor. Eespool kirjeldasime alalisvoolugeneraatori töötamis-

põhimõtet. Kuid sama ehitusega masinat võime kasutada ka mootorina. Tõepoolest, kui toita joonisel 1-3 näidatud alalisvoolumasina ankrut mingist alalisvoolu allikast, tekib ankru mähises vool. Ankru mähise keeru vooluga külgedele rakendub mehaaniline jõud, mille suuna saame määrata vasaku käe juhise abil.

Mehaanilise jõu suurus avaldub valemist:

$$F = BIl \text{ N}, \tag{1-4}$$

kus B — magnetiline induktsioon kohas, kus asub voolust läbitav juhe, Vsec/m^2,

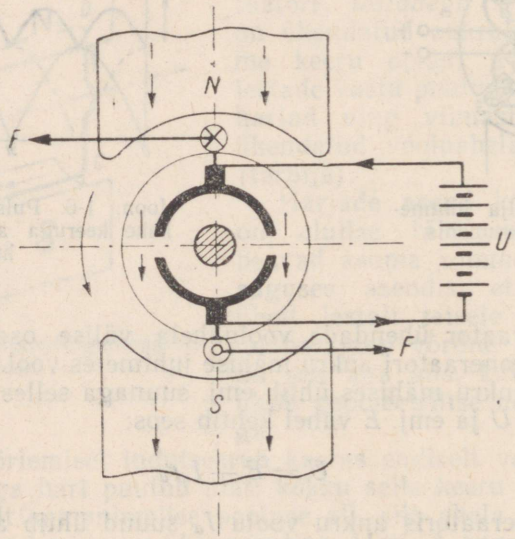
I — vool juhtmes,

l — magnetväljas asuva juhtme aktiivse osa pikkus.

Jõud kilogrammides

$$F = 0{,}102\, BIl \text{ kg}. \tag{1-4a}$$

Joonisel 1-7 näeme alalisvoolumootori ehituse skeemi.



Joon. 1-7. Alalisvoolumootori ehituse skeem

Harjade üleminekul ühelt lestalt teisele muutub ankru keerus voolu suund just siis, kui keeru külg jõuab ühe pooluse alt teise alla. Nii on alati samanimelise pooluse all asuvas keeru küljes voolul sama suund ja seega mõjub keerule muutumatu suunaga mehaaniline jõud. Nende jõudude mõjul hakkab ankur pöörlema.

Pöörlemissuund muutub vastupidiseks, kui muudame voolu suunda ankrus, jättes magnetvälja suuna endiseks.

Mootori pöörlema hakkamisel tekib ankru keerus emj. samal põhjusel kui generaatoris. See emj. on aga vastusuunaline vooluga ankrus ja seega ka pingega ankru klemmidel (Lenzi juhis). Seda emj. nimetatakse *vastuelektromotoorseks jõuks.*

Seos ankrule rakendatud võrgupinge ja ankrus tekkiva vastuelektromotoorse jõu vahel:

$$U = E + I_a r_a. \qquad (1\text{-}5)$$

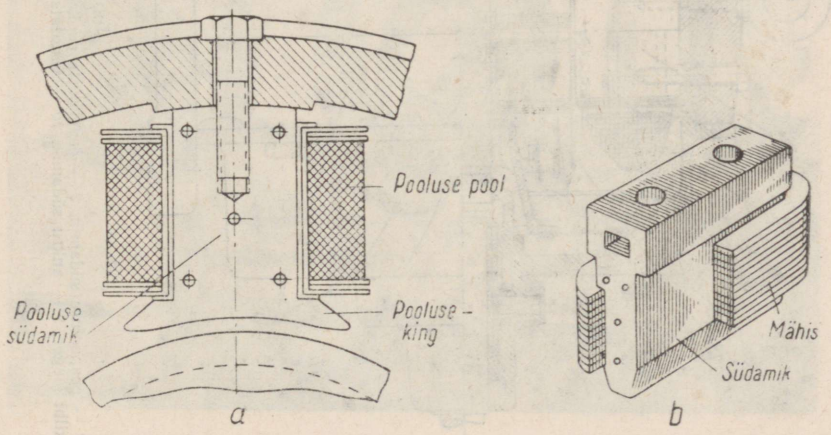
Vool alalisvoolumootori ankrus on elektromotoorsele jõule vastassuunaline. Ta on tingitud ankrule rakendatud välisest (võrgu-) pingest. Seepärast on võrgupinge U võrdne ankru vastuelektromotoorse jõu E ning ankru mähises tekkiva pingelangu $I_a r_a$ summaga.

Mootori pöördemoment, olles tingitud samadest põhjustest kui generaatoriski, mõjub pöörlemissuunas.

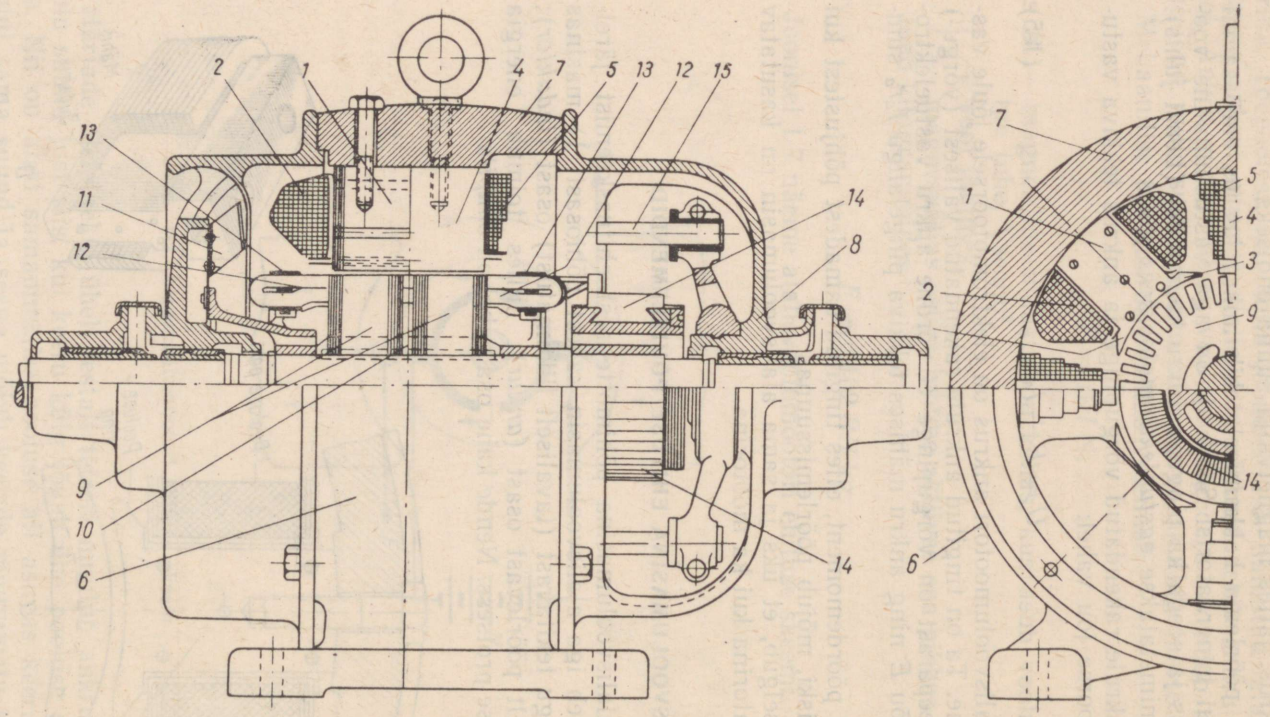
Seega selgub, et üks ja sama alalisvoolumasin on kasutatav nii generaatorina kui ka mootorina.

1-2. ALALISVOOLUMASINA EHITUSE PÕHIELEMENDID

Nagu alalisvoolumasina põhimõttelisest ehitusskeemist järeldub, koosneb iga alalisvoolumasin kahest põhiosast: 1) masinas magnetvoogu tekitavast (tavaliselt liikumatust) osast (*induktor*); 2) tavaliselt pöörlevast osast (*ankur*), milles toimub energia muundumise protsess. Nende kahe osa vahel on *õhupilu.*



Joon. 1-8. Alalisvoolumasina peapoolused (*a*) ja lisapoolused (*b*)



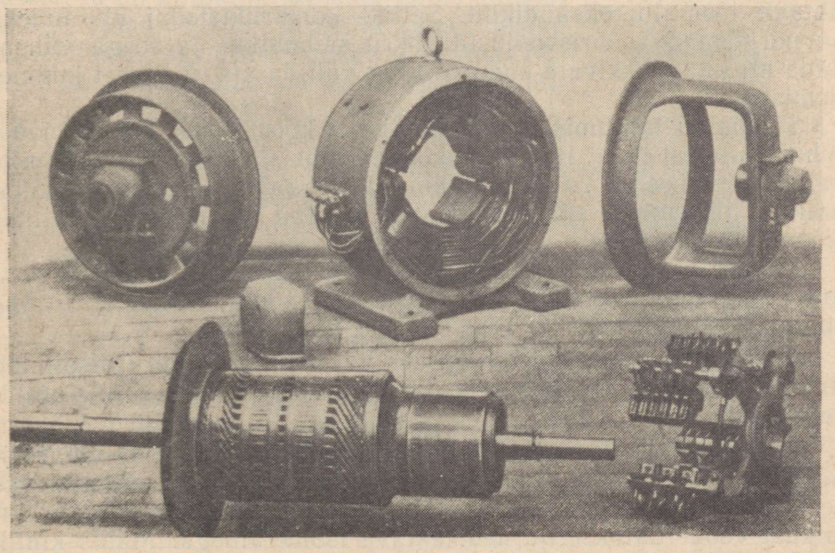
Joon. 1-9. Alalisvoolumasina piki- ja ristlõige:

1 — peapooluse südamik, *2* — peapooluse pool, *3* — poolusring, *4* — lisapooluse südamik, *5* — lisapooluse pool, *6* — kere, *7* — ike, *8* — kilbi laager, *9* — ankru südamik, *10* — ventilatsioonikanal, *11* — ventilaator, *12* — ankru mähis, *13* — bandaaž, *14* — kommutaator, *15* — harjahoidja

Masina liikumatu osa koosneb omakorda: *peapoolustest,* mis on ette nähtud põhimagnetvoo tekitamiseks; *lisapoolustest,* mille ülesandeks on parandada kommutaatori töötamist (vt. ptk. V); *kerest,* mille külge on kinnitatud pea- ja lisapoolused (joon. 1-8). Osa, milles indutseeritakse emj., nimetatakse ankruks. Viimane koosneb: silindrilisest südamikust, mis on koostatud terasplekkidest ja välispinnal varustatud uuretega, mähisest ja kommutaatorist (joon. 1-9).

Masina kere külge kinnitatakse pea- ja lisapoolused. Kerel on alus, mille abil masin kinnitatakse vundamendile. Kere seda osa, mida läbib pea- ja lisapooluste magnetvoog, nimetatakse *ikkeks.* Kere valatakse malmist või terasest või siis painutatakse paksust terasplekist. Suure võimsusega masinate kere tehakse diametraalselt poolitatav, et kergendada masina monteerimist. Kere külge, tema otspindadele, kinnitatakse laagrikilbid. Laagrikilpidesse on kinnitatud laagrid (joon. 1-10). Kui kere läbimõõt on suur (üle 1 m), siis kasutatakse ankru võlli toena *laagripukke,* mis kinnitatakse masina *alusplaadile.* Enamasti on laagritena kasutusel veerelaagrid, s. o. kuul- või rull-laagrid. Laagripukid on tihti varustatud rõngasõlitusega liugelaagritega. Kere varustatakse peale muu veel ühe või mitme tõsterõngaga ümberpaigutamise ja kohaleasetamise hõlbustamiseks.

Peapooluse põhiosaks on *südamik* (joon. 1-8). Südamik koostatakse enamasti 0,5 ... 1 mm paksusest elektrotehnilisest lehterasest, mis on tikkpoltidega kokku tõmmatud. Peapooluse südamiku



Joon. 1-10. Alalisvoolumasin lahtivõetult

see osa, mis asub ankru vastas, tehakse erilise kujuga ja laiem (joon. 1-8). Seda laiemat osa südamikust nimetatakse *pooluskingaks.* Pooluskinga servad lõigatakse libamisi, et magnetvoo jaotust pooluse all teha võimalikult sujuvaks. Pooluskinga äär on aga ühtlasi pooluse südamikule asetatavale ergutusmähisele toeks. Kere vastu asetatav pooluse südamiku otspind tehakse kumer ning poolus kinnitatakse kere külge poltidega (joon. 1-8).

Ergutusmähis kujutab endast pooli, mis on mähitud pooluse südamikule kinnitatud pooli alusele. Pooli alus koosneb tavaliselt lehtterasest valmistatud karbist ja isoleerainest vooderdusest (hülsist). Et paremini ära kasutada pooluste südamikkude vahelist ruumi, tehakse ergutusmähise pool mõnikord astmeline (joon. 1-9). Pooli paremaks jahutamiseks jaotatakse pool pikuti mitmeks osaks, kusjuures osade vahele jäetakse ventilatsioonikanalid.

Lisapoolused koosnevad samuti südamikust, pooluskingast ja poolist (joon. 1-8). Lisapooluse pooli juhtmena kasutatakse suhteliselt jämedat neljakandilist (mõnikord ka ümarat) vasktraati. Lisapoolused kinnitatakse kere külge samuti poltidega ning nad asuvad täpselt geomeetrilise neutraaljoone kohal. Lisapooluste südamik on enamasti massiivne.

Ankur kujutab endast silindrilist lehtterasest koostatud keha, mis on kinnitatud masina terasvõllile. Ankru välispinnal asuvad uurded, millesse on paigutatud ankru mähis.

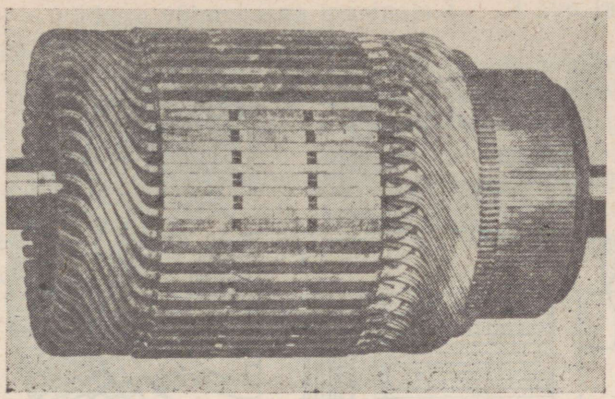
Ankru südamik koosneb lehtterasest valmistatud hambulistest ketastest. Kasutatakse enamasti 0,5 mm paksust elektrotehnilist lehtterast mark Э 12 või Э 21. Üksikud kettad isoleeritakse üksteisest kas õhukese paberiga, isoleeriva lakiga või on isolatsiooniks lihtsalt loomulik oksüüdikiht. Sellise konstruktsiooni ülesandeks on nõrgendada pöörisvoolusid ankru südamikus ja seega vähendada masinas tekkivaid kadusid ning vältida ankru liigset kuumenemist.

Südamiku jahtumise soodustamiseks koostatakse ankur mõnel juhul mitmest 4 . . . 10 cm paksusest pakist (joon. 1-11), mille vahele jäetakse 8 . . . 10 mm laiused radiaalsed ventilatsioonikanalid. Väiksematel ankrutel on ette nähtud aksiaalsed ventilatsioonikanalid.

Jäikuse saavutamiseks tehakse ankru südamiku äärmised kettad 1 . . . 2 mm paksusest lehtterasest ning kogu ankur surutakse surverõngastega telje suunas poltide abil kokku.

Ankru jahutamise tõhustamiseks varustatakse ankru otspinnad tiibadega, suurema võimsuse puhul aga kinnitatakse võllile eraldi ventilaator (joon. 1-9).

Ankru mähis koosneb üksikutest *sektsioonidest (poolidest).* Sektsioonid valmistatakse erilistel šabloonidel ning paigutatakse seejärel uuretesse (joon. 1-12). Mähise isoleerimiseks ankru südamikust vooderdatakse uurded teatava isoleerainega. Mähis kinnitatakse uuretes puitkiiludega või hoitakse paigal ankru pinnale



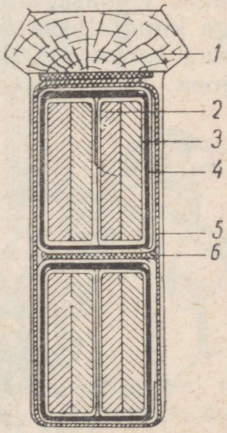
Joon. 1-11. Plekipakkidest koosnev ankur

vastavatesse süvistesse asetatud terastraadist bandaažide abil (joon. 1-9). Uuretest väljaulatuvad mähise osad, nn. *laupühendused*, kinnitatakse samuti terastraadist *bandaažidega.*

Kommutaator on alalisvoolumasina üheks vastutusrikkamaks osaks ning tema korrasolekust ja konstruktsiooni kindlusest sõltub suurel määral alalisvoolumasina töökindlus.

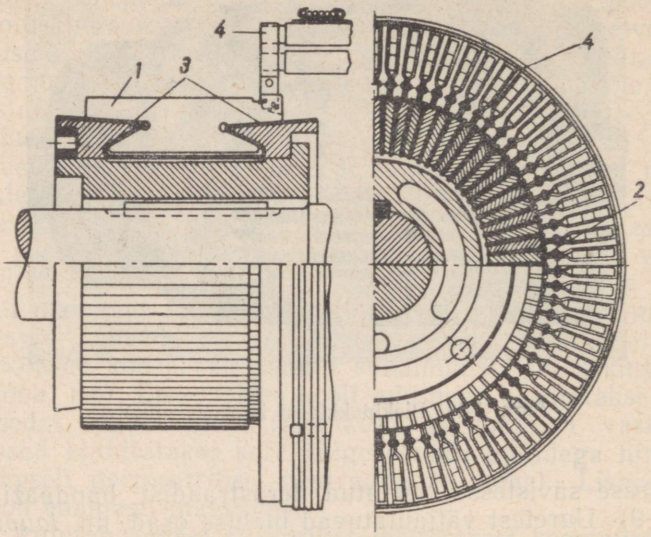
Kommutaatori põhielemendiks on kommutaatori lest (lamell). Lest valmistatakse vasest, ta on kiilukujuline ning omab kalasabatapi (joon. 1-13). Kommutaatori lestad isoleeritakse üksteisest mikaaniit-vahetükkidega ning kommutaatori kerest mikaniithülsiga (joon. 1-13). Ankru mähise otsad joodetakse selleks ettenähtud lesta lõhestatud lible (lipukese) külge ning hoitakse koos tinutatud vaskplekist klambritega (joon. 1-13). Kommutaatori lestad kiilutakse kalasabakujulise otsa abil kommutaatori kere vastavate kooniliste pindade vahele. Kommutaator peab omama rangelt ringsilindri kuju, sest vastasel korral võib kommutaatori töötamine olla tõsiselt häiritud.

Kommutaatorile asetatakse peale liikumatud *harjad.* Harjad valmistatakse retortsöest või retortsöe, grafiidi ja vase segust. Harjade kaudu ühendatakse masina ankru mähis vooluahela välise osaga. Lisapoolustega varustatud masinates asetatakse harjad geomeetrilise neutraaljoone kohale. Harjad on asetatud *harjahoidjatesse* ja ühen-



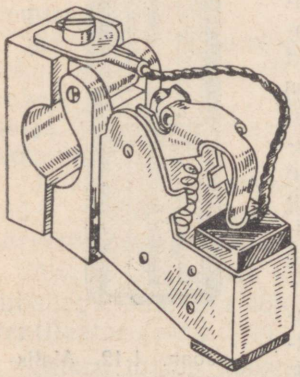
Joon. 1-12. Alalisvoolumasina ankru uure:

1 — kiil, *2* — juhe, *3* — keeru isolatsioon, *4* — sektsiooni isolatsioon, *5* — uurde isolatsioon, *6* — presspapp-vahekiht



Joon. 1-13. Alalisvoolumasina kommutaator
1 — lest, *2* — mikaniitvahetükk, *3* — mikaniithülss, *4* — ühenduslible

datud viimasega harjasse kinnitatud juhtme abil. Harjahoidjad aga kinnitatakse *harjapoltidele*. Harjapoldid on omakorda kinnitatud *harjatraaversile* ja viimasest isoleerpukside abil isoleeritud (joon. 1-9). Traavers kinnitatakse kas laagrikilbi või suuremates masinates masina kere külge. Traavers on tavaliselt pööratav, et oleks vajaduse korral võimalik harju õigesse asendisse nihutada.



Joon. 1-14. Alalisvoolumasina harjahoidja

Hea kontakti tagamiseks harjade ja kommutaatori pinna vahel on harjahoidja varustatud reguleeritava survevedruga, mis surub harja vastu kommutaatori pinda (joon. 1-14). Tihti asub ühel harjapoldil vastavates harjahoidjates mitu harja kõrvuti. Harja laius kommutaatori ümbermõõdu sihis on enamasti niisugune, et hari katab kaks-kolm kommutaatori lesta.

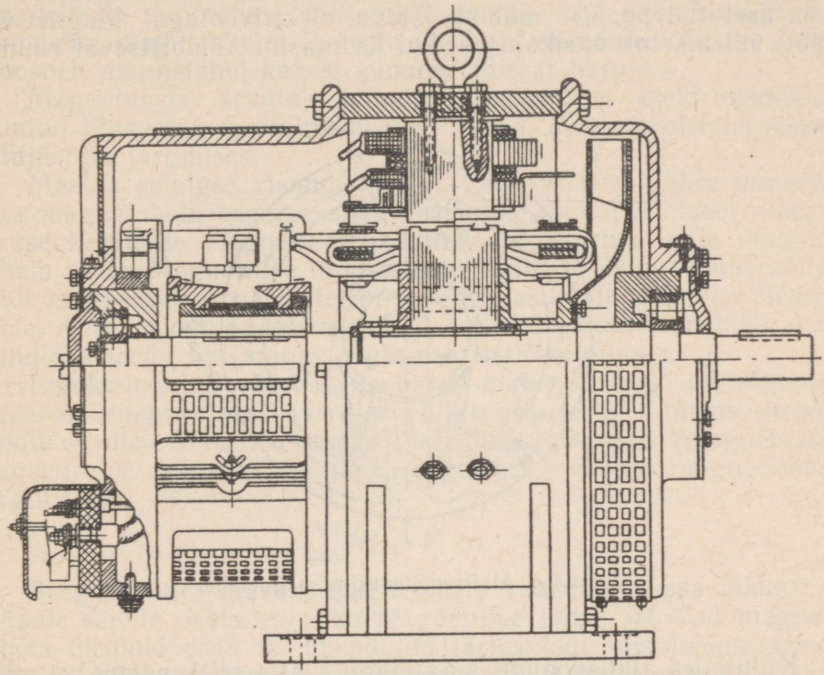
Sama polaarsusega harjapoldid ühendatakse omavahel ühenduslattide abil ning viimased masina klemmidega. Tavaliselt on harjapoltide arv võrdne masina pooluste arvuga. Õhupilu pooluskingade ja ankru välispinna vahel on suhteli-

selt väike — väikese võimsusega masinais 1 . . . 3 mm ja suurema võimsusega masinais 10 . . . 15 mm.

Alalisvoolumasinaid ehitatakse mitmesuguse konstruktsiooniga, sõltuvalt tingimustest, millistes masinat kasutatakse. Nii võivad alalisvoolumasinad olla lahtise, kaitstud, kinnise ja plahvatuskindla ehitusega.

Lahtised masinad on lihtsaimad, sest nad ei oma mingeid konstruktiivseid abinõusid pöörlevate ja voolu juhtivate osade kaitseks.

Kaitstud masinates on välditud võõrkehade ja veepritsmete sissesattumine (joon. 1-15).



Joon. 1-15. Alalisvoolumasina konstruktsioone

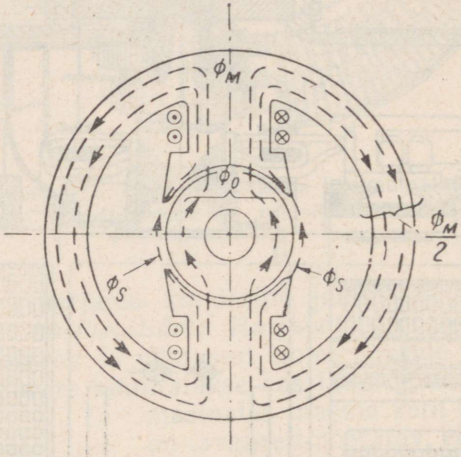
Kinnised masinad on kaitstud välisõhu sissesattumise eest masinasse. Kui kinnine masin on hermeetiliselt suletud välise keskkonna suhtes, siis on selline masin niiskuskindel.

Plahvatuskindlad masinad peavad taluma plahvatusohtliku keskkonna plahvatusi masina sees, ilma et leek masinast välja tungiks. Samuti ei tohi välise plahvatuse leek sattuda masina sisemusse.

MAGNETAHEL JA TEMA ARVUTAMISE ALUSED

2-1. ALALISVOOLUMASINA MAGNETVÄLI

Nagu eespool (p. 1-1) alalisvoolumasina töötamispõhimõtte selgitamisel ilmnes, peab igas elektrimasinas olema magnetväli. Magnetilisest induktsioonist sõltub generaatoris indutseeritava emj. ja mootoris tekkiva mehaanilise pöördemomendi suurus. Magnetväli alalisvoolumasinas tekitatakse tavaliselt peapoolustele asetatud pooluse mähist läbiva elektrivooluga. Magnetväli läbib nii masina üksikuid osi kui ka masinat ümbritsevat ruumi.



Joon. 2-1. Alalisvoolumasina magnetahel

Kujutades alalisvoolumasina magnetvälja pilti, näeme, et suurem osa magnetväljast läbib masina aktiivseid elemente, s. o. pooluste südamikke, iket, õhupilu ja ankrut. Vähem osa väljast sulgub mööda lühemat teed, läbides poolustevahelist ruumi, seejuures ankrut ja õhupilu läbimata. Joonisel 2-1 on näidatud kahepooluselise alalisvoolumasina magnetvälja pilt. Sellest pildist nähtub, et kogu magnetvoog Φ_M, mis tekitatakse masinas pooluste mähiseid läbiva vooluga, koosneb kahest osast: *põhivoost* Φ_0, mis läbib õhupilu ja ankrut, ning *puistevoost* Φ_s, mis sulgub väljaspool ankrut, õhupilu läbimata.

Täpsemalt loeme põhimagnetvooks Φ_0 seda magnetvoogu, mis läbib õhupilu poolusejaotuse τ ulatusel, masina pooluskingade ja vastasasuva ankrupinna kohal.

Nagu eespool (p. 1-1) selgus, on oluline luua ankrul asuvate juhtmete asukohas (ankru pinnal, õhupilus) magnetväli niisuguse induktsiooniga B_0, et saada generaatoris nõutav emj. E või mootoris nõutav jõud F.

Eelneva põhjal on ühe pooluse voog Φ_0 antud suuruseks. Seega on ülesandeks arvutada alalisvoolumasina magnetahel selliselt, et saada nõutav põhivoog Φ_0.

2-2. MAGNETAHELA ARVUTAMISE ALUSED

Magnetahela all mõistame seda masina osa, milles sulguvad vaadeldava magnetvoo välijooned. Joonisel 2-1 näeme alalisvoolumasina magnetahelat ja tema üksikuid elemente. Masina ikkes koosneb magnetahel kahest sümmeetrilisest harust.

Magnetahela arvutus toimub teoreetilisest elektrotehnikast tuntud lihtsustatud arvutusmeetodi alusel. Meetodi olemus seisab üldjoontes järgmises.

Masina esialgse visandi alusel (joon. 2-1) valitakse materjal iga magnetahela osa jaoks. Kogemuslike andmete alusel määratakse keskmine magnetilise induktsiooni väärtus igale magnetahela osale. Magnetilise induktsiooni väärtuse valik toimub sõltuvalt magnetahela osa materjalist ning vastavalt selle osa ülesandele. Antud põhimagnetvoog Φ_0 ja valitud induktsioon määravad kindlaks seega iga magnetahela osa ristlõikepinna s.

Induktsiooni B väärtuse ja osade materjali järgi on võimalik määrata magneetimiskõveraist väljatugevuse H väärtus. Koguvoolu seaduse alusel on magnetiliste pingete summa (magnetvälja tugevuse ja magnetahela pikkuse korrutis) võrdne magneetimisergutusega:

$$\sum Hl = F.$$

Seega, teades masina magnetahela vaadeldava osa pikkust l, leiame sellele osale vajaliku magnetilise pinge Hl. Kui magnetahela üksikud osad on ühendatud järjestikku, siis leiame antud magnetvoo Φ_0 tekitamiseks vajaliku magneetimisergutuse üksikute magnetahela osade magnetiliste pingete summana, s. t.:

$$F = wI_e = \sum_1^k H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots, \qquad (2\text{-}1)$$

kus F — magnetvoo Φ_0 tekitamiseks vajalik magneetimisergutus,
w — pooluste mähise keerdude arv,
I_e — vool pooluse mähises.

Kuigi masina magnetahel koosneb ikkes kahest harust (joon. 2-1), võime, arvestades seda, et mõlemad harud on sümmeetrilised, asendada need ühe haruga, mille ristlõige on võrdne ikke kahekordse ristlõikega. Siis on kõik masina magnetahela osad ühendatud järjestikku.

Eespool toodud arvutusskeemis ei ole arvesse võetud puistevoogu Φ_s. Puistevoo tõttu on magnetvoog üksikutes magnetahela osades erinev. Nagu näha joonisel 2-1, on ikkes ja pooluste südamikes voog puistevoo võrra suurem voost õhupilus ja ankrus. Et seda arvesse võtta, peame kindlaks määrama puistevoo suuruse masinas. Puistevoo arvutamiseks peame arvutama kogu magnetvälja nii masinas kui ka õhus. Niisuguste küllalt keerukate arvutuste aluseks on magneetimisergutuse jagunemine magnetahela üksikutes osades.

2-3. PUISTEVOOG

Eespool selgus, et masinas tekkiv koguvoog Φ_M on võrdne põhivoo Φ_0 ja puistevoo Φ_s summaga, s. o.:

$$\Phi_M = \Phi_0 + \Phi_s. \tag{2-2}$$

Seda avaldist võime kirjutada ka nii:

$$\Phi_M = \Phi_0 \left(1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_0}\right) = \Phi_0 k_s, \tag{2-3}$$

kus tegur $k_s = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_0}$ kannab *puisteteguri* nimetust.

Nagu näitavad masinate magnetvälja uurimised, on puisteteguri väärtus tavaliselt $k_s = 1{,}12 \ldots 1{,}25$.

Puistevoo Φ_S ja puisteteguri k_S määramiseks kasutatakse graafilist ühikvootorude abil magnetvälja pildi väljajoonestamise meetodit. Tihti kasutatakse puisteteguri või puistevoo määramiseks mitmesuguseid empiirilisi valemeid. Toome siinkohal ühe nendest:

$$\Phi_s = k \frac{l_m h_m}{\tau} (F_\delta + F_z + F_a) \cdot 10^{-8} \text{ V sec}, \tag{2-4}$$

kus l_m — pooluse pikkus m,
h_m — pooluse kõrgus m,
k — tegur, mis sõltub sellest, kas masin omab lisapooluseid, $k = 8 \ldots 9$ (väiksem, kui lisapooluseid ei ole),
F_δ, F_z, F_a — õhupilu, hammaste ja ankru südamiku magneetimisergutused.

Joonisel 2-1 antud skeemi alusel koosneb magnetahel järgmistest osadest: õhupilu, hambad ja uurded, ankru südamik, poolused, ike.

Valemi 2-1 põhjal on kogu masina magneetimisergutus:

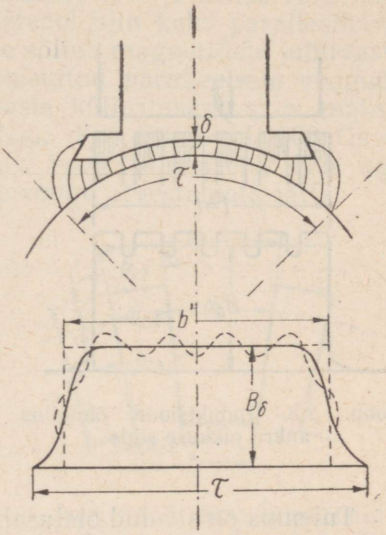
$$F = F_\delta + F_z + F_a + F_M + F_i, \tag{2-5}$$

kus F_s — õhupilu magneetimisergutus,
F_z, F_a, F_M ja F_i — vastavalt hammaste, ankru südamiku, pooluste ja ikke magneetimisergutused.

Järgnevalt selgitame üksikult masina iga magnetahela osale vastava magneetimisergutuse määramist. Joonisel 2-1 on antud nelja poolusega alalisvoolumasina magnetahela skeem.

2-4. MAGNETAHELA OSADE MAGNEETIMISERGUTUSED

Õhupilu magneetimisergutus. Magnetvoog õhupilus poolusejaotuse τ ulatusel ei ole ühtlane. Magnetilise induktsiooni jaotus sõltub ühelt poolt pooluskinga kujust ja teiselt poolt ankru uurete kujust ning arvust poolusejaotuse ulatusel. Oletame esialgu, et ankru pind on sile. Induktsiooni jaotus poolusejaotuse ulatusel on siis trapetsisarnane. Suurim induktsioon on pooluskinga keskmise osa kohal, kus õhupilu on ühesuurune. Pooluskinga äärte poole induktsioon väheneb, sest seoses õhupilu suurenemisega suureneb ka selles kohas magnetiline takistus (joon. 2-2).



Joon. 2-2. Magnetilise induktsiooni jaotus õhupilus

Kui arvesse võtta ankru pinnal asuvad uurded, siis magnetilise induktsiooni jaotuse pilt muutub keerukamaks, nagu on näidatud joonisel 2-2 punktiirjoonega.

Tegelik induktsiooni jaotus on seega muutuv kogu poolusejaotuse ulatusel. Arvutuse lihtsustamiseks oletame, et induktsioon on konstantne ning sama tulemuse saamiseks asendatakse tegelik siledale ankrule vastav trapetsisarnane induktsiooni jaotuse kõver sama suure pinnaga nelinurgaga, millel on sama kõrgus, kuid vastavalt kitsam alus b' (vt. joon. 2-2). Suurust b' nimetatakse *arvutuslikuks poolusejaotuseks* (kaareks). Suhet

$$\alpha' = \frac{b'}{\tau} \tag{2-6}$$

nimetatakse arvutuslikuks pooluse *katteteguriks*. Lisapoolusteta masinail $\alpha' = 0{,}7 \ldots 0{,}8$, lisapoolustega masinail $\alpha' = 0{,}62 \ldots 0{,}72$.

Induktsiooni jaotus ei ole ühtlane ka pooluse (ankru) pikkust pidi. Tihti omab ankur radiaalseid ventilatsioonikanaleid, mis põhjustab induktsiooni muutumist (joon. 2-3). Ka sel puhul oletatakse, et induktsioon on konstantne ja võrdne B_δ ning asendatakse ham-

buline induktsiooni kõver sama pinnaga nelinurgaga, mille kõrgus on B_δ ja laius l' (joon. 2-3).

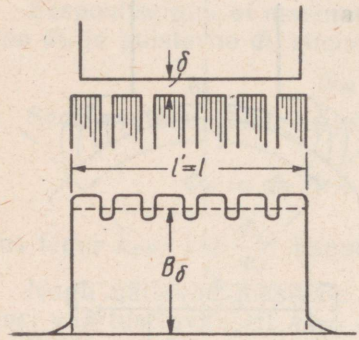
Arvutuslik ankru pikkus l' on peaaegu võrdne ankru pakkide summaarse laiusega l (ilma kanaliteta). Seepärast tavaliselt võetakse $l' = l$.

Nüüd saab avaldada põhimagnetvoo

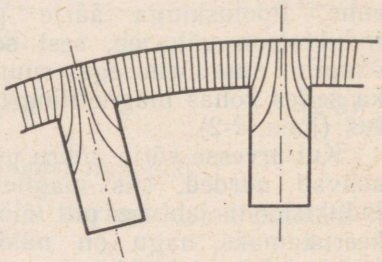
$$\Phi_0 = B_\delta b' l = B_\delta \alpha' \tau l,$$

millest

$$B_\delta = \frac{\Phi_0}{\alpha' \tau l}. \qquad (2\text{-}7).$$



Joon. 2-3. Induktsioon õhupilus ankru pikkuse sihis



Joon. 2-4. Välja pilt õhupilus

Tulemus on saadud oletusel, et ankru pind on sile. Tegelikult on ankru pinnal uurded ja kanalid, mistõttu induktsiooni jaotus ei ole ühtlane. Hamba ja uurde kohal oleva välja pilt õhupilus on näha joonisel 2-4.

Uurde kohal suureneb magnetiline takistus, mis põhjustab kogu õhupilu magnetilise takistuse suurenemise. Arvutustel eeldatakse, et ankur on sileda pinnaga, ja suurendatakse vastavalt õhupilu

$$\delta' = k_\delta \delta. \qquad (2\text{-}8)$$

Suurust δ' nimetatakse *arvutuslikuks õhupilu laiuseks* ning tegurit k_δ — *õhupilu teguriks* (*Carteri tegur*).

Õhupilu teguri k_δ väärtust võib määrata, lähtudes täpsest väljapildist õhupilus. Tegur k_δ on alati suurem kui üks. Enamasti arvutatakse aga k_δ empiirilisest valemist, näiteks

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta}, \qquad (2\text{-}9)$$

kus $t_1 = \frac{\pi D_a}{Z}$ — hamba samm ankru pinnal,

b_{z1} — hamba laius ankru pinnal,

D_a — ankru läbimõõt,

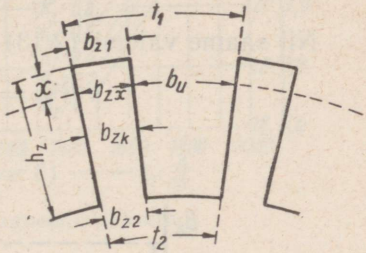
Z — hammaste (uurete) arv ankrul.

Seega saame nüüd arvutada kahe õhupilu magneetimisergutuse

$$F = H_\delta 2\delta' = \frac{B_\delta}{\mu_0} 2\delta' = \frac{2}{\mu_0} B_\delta k_\delta \delta \text{ A}. \quad (2\text{-}10)$$

Hammaste magneetimisergutus. Õhupilust suundub magnetvoog Φ_0 ankru pinnal asuvatesse hammastesse ja nende vahel olevatesse uuretesse. Seega on magnetvool siin kaks paralleelharu. Kahe paralleelvoo omavaheline suhe sõltub magnetiliste juhtivuste suhtest uurde ja hamba kohal. Nimetatud paralleelsete voogude vastastikune suurus oleneb hammaste küllastusest, s. o. maksimaalsest induktsioonist hambas B_{zmax}. Kui $B_{zmax} < 18\,000$ Gs $= 1{,}8$ Vsec/m^2, siis on uuret läbiv voog tähtsusetu. Kui aga $B_{zmax} > 18\,000$ Gs, siis ei saa uurde voogu arvestamata jätta.

Järgnevalt teostame arvutuse hamba jaotuse t_1 kohta, sest kõiki hambaid läbib sama voog ning nad on samades magnetilistes tingimustes, vastavalt ulatusel b' oletatud konstantsele induktsioonile B_δ.



Joon. 2-5. Hammaste mõõtmed

Vaatleme ankru välispinnast kaugusel x asuvat kontsentrilist lõiget (joonisel 2-5 märgitud punktiiriga). Siis hambajaotusele t_1 vastav magnetvoog

$$\Phi_t = \Phi_{zx} + \Phi_{ux}, \quad (2\text{-}11)$$

kus Φ_{zx} — hamba voog vaadeldavas lõikes,

Φ_{ux} — uurde voog samas.

Jagame selle võrduse mõlemad pooled hamba ristlõikepinnaga S_{zx} vaadeldavas kohas:

$$\frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{\Phi_{zx}}{S_{zx}} + \frac{\Phi_{ux}}{S_{zx}};$$

korrutame ja jagame paremal asuvat teist liidetavat uurde ristlõikepinnaga S_u:

$$\frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{\Phi_{zx}}{S_{zx}} + \frac{\Phi_{ux}}{S_u} \cdot \frac{S_u}{S_{zx}}; \quad (2\text{-}12)$$

lõpuks võime kirjutada:

$$B'_{zx} = B_{zx} + B_{ux} k_{zx}, \quad (2\text{-}13)$$

kus B'_{zx} — arvutuslik magnetiline induktsioon hambas, kui kogu hamba jaotusele vastav voog läbiks ainult hammast,

B_{zx} — tõeline magnetiline induktsioon hambas,

B_{ux} — tõeline magnetiline induktsioon uurdes,

$k_{zx} = \frac{S_u}{S_{zx}}$ — *hambategur*, mis sõltub ainuüksi hamba ja uurde mõõtmetest.

Kuna magnetvoog uurdes asub mittemagnetilises keskkonnas, siis

$$B_{ux} = \mu_0 H_{ux},$$

kus H_{ux} — väljatugevus uurdes.

Hammas ja uure asuvad magnetvoo suhtes rööbiti, seega induktsioon B_u uurdes on tingitud samast väljatugevusest mis hambaski, s. o.

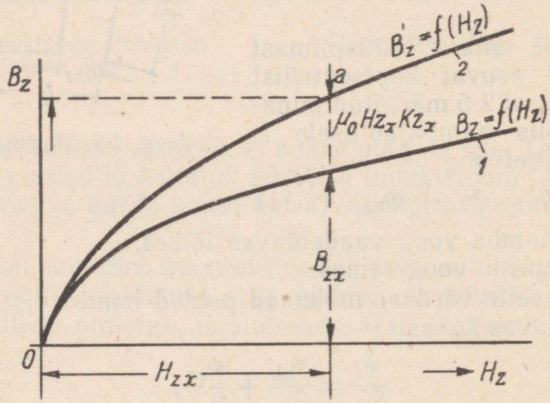
$$H_{ux} = H_{zx}, \tag{2-14}$$

ning

$$B_{ux} = \mu_0 H_{zx}.$$

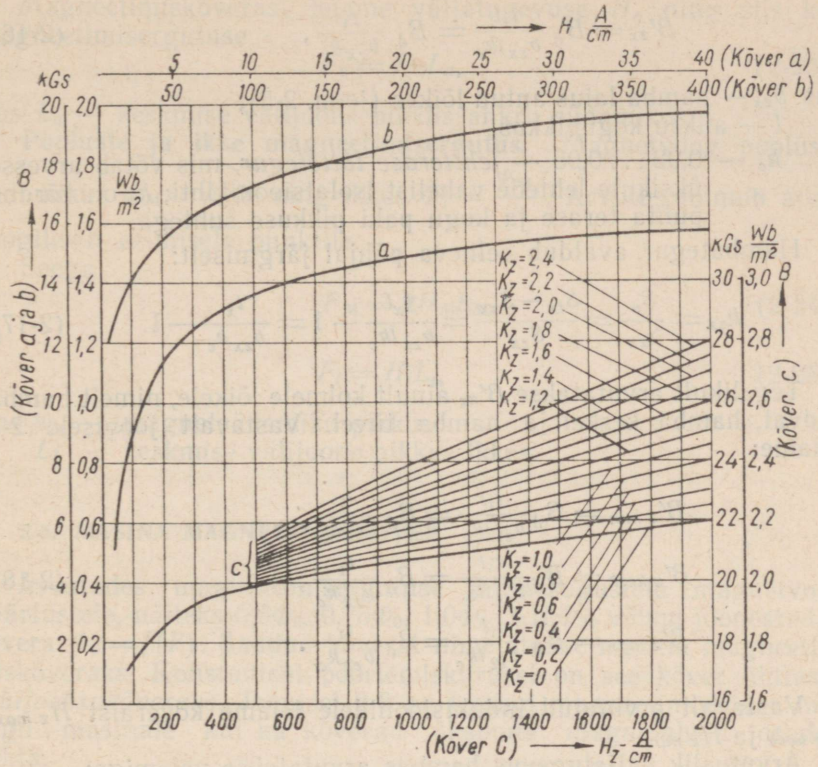
Nii saame valemi (2-13) kirjutada järgmiselt:

$$B'_{zx} = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} k_{zx}. \tag{2-15}$$



Joon. 2-6. Hammaste magneetimisergutus

Saadud avaldis on aluseks hammaste magneetimisergutuse arvutamisel. Selleks ehitame funktsiooni $B'_{zx} = f(H_{zx})$ kõvera kasutatava elektrotehnilise terase margi jaoks (joon. 2-6) mitmesugustele hambateguri k_{zx} väärtusele. Selleks oletame tõelise induktsiooni B_{zx} mingi väärtuse, leiame kõverast *1* vastava väljatugevuse



Joon. 2-7. Lehtterase magneetimiskõverad

H_{zx}, arvutame korrutise $\mu_0 H_{zx} k_{zx}$ ja leiame kõverale *2* vastava punkti *a* valemist (2-15) leitud B'_{zx} väärtuse järgi.

Teostades selliseid arvutusi B_{zx} mitmesugustel väärtustel, saame üles joonestada kogu kõvera *2*. Joonisel 2-7 on antud elektrotehnilisele terasele Э11 vastavad magneetimiskõverad ning abikõverad k_z väärtustele 0 kuni 2,4.

Kui sellised kõverad on konstrueeritud, võime vastupidiselt eelmisele määrata tõelise induktsiooni hambas B_{zx}, arvutades arvutusliku induktsiooni B'_{zx} ning hambateguri k_{zx}. Kui B_{zx} on teada, leiame ka H_{zx} (joon. 2-7).

Arvutuslik induktsioon B'_{zx} leitakse oletusel, et kogu hambajaotusele vastav voog läbib hamba, s. t.:

$$\Phi_{zx} = \Phi_t,$$

ehk

$$B'_{zx} b_{zx} l k_c = B_\delta t_1 l,$$

millest

$$B'_{zx} = B_\delta \frac{t_1 l}{b_{zx} l k_c} = B_\delta \frac{t_1}{b_{zx} k_c}, \qquad (2\text{-}16)$$

kus b_{zx} — hamba laius antud lõikes (joon. 2-5),

l — ankru kogupikkus,

k_c — 0,92 ... 0,95 — *lehtterase täitetegur,* mis võtab arvesse üksikute lehtede vahelist isolatsioonikihti; k_c on võrdne puhta terase ja kogu paki pikkuse suhtega.

Hambategur avaldub eelneva põhjal järgmiselt:

$$k_{zx} = \frac{S_u}{S_{zx}} = \frac{S_{tx} - S_{zx}}{S_{zx}} = \frac{t_x l}{b_{zx} l k_c} - 1 = \frac{t_x}{b_{zx} k_c} - 1. \qquad (2\text{-}17)$$

Tegelikult arvutatakse B'_{zx} ainult kolmele lõikele, nimelt hamba ladval, hamba keskel ja hamba tüvel. Vastavalt joonisele 2-5 leiame:

$$\begin{aligned} B'_{z\,min} &= B_\delta \frac{t_1 l}{b_{z1} l k_c} = B_\delta \frac{t_1}{b_{z1} k_c}, \\ B'_{z\,kesk} &= B_\delta \frac{t_1 l}{b_{zk} l k_c} = B_\delta \frac{t_1}{b_{zk} k_c}, \\ B'_{z\,max} &= B_\delta \frac{t_1 l}{b_{z2} l k_c} = B_\delta \frac{t_1}{b_{z2} k_c}. \end{aligned} \qquad (2\text{-}18)$$

Vastavalt arvutatud induktsioonidele leiame kõveraist $H_{z\,max}$, $H_{z\,kesk}$ ja $H_{z\,min}$.

Arvutuslik väljatugevus hambas arvutatakse valemiga:

$$H_z = \frac{H_{z\,min} + 4H_{z\,kesk} + H_{z\,max}}{6}. \qquad (2\text{-}19)$$

Seega ühele pooluspaarile vastav hammaste magneetimisergutus

$$F_z = 2H_z h_z, \qquad (2\text{-}20)$$

kus h_z — hamba kõrgus (joon. 2-5).

Ankru südamiku magneetimisergutus. Magnetvoog ankru südamikus $\Phi_a = \frac{\Phi_0}{2}$ (vt. joon. 2-1).

Ankru südamiku ristlõige

$$S_a = h_a l k_c, \qquad (2\text{-}21)$$

kus h_a — ankru südamiku kõrgus.

Induktsioon südamikus

$$B_a = \frac{\Phi_0}{2 h_a l k_c}. \qquad (2\text{-}22)$$

Magneetimiskõverast leiame väljatugevuse H_a ning siis ka magneetimisergutuse

$$F_a = H_a L_a, \tag{2-23}$$

kus L_a — keskmise välijoone pikkus ankru südamikus.

Pooluste ja ikke magneetimisergutus. Magnetvoog pooluse südamikus $\Phi_M = k_s \Phi_0$ ning ikkes $\Phi_i = \frac{\Phi_M}{2}$. Arvutus toimub analoogiliselt eelmisele punktile.

Seega

$$F_M = 2H_M h_M, \tag{2-24}$$

ja

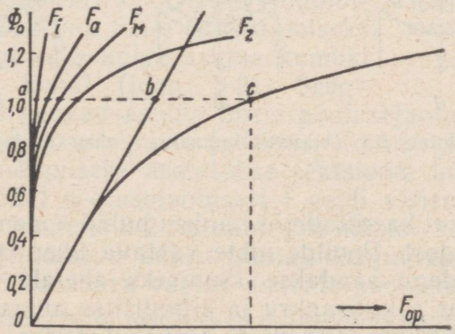
$$F_i = H_i L_i, \tag{2-25}$$

kus h_M — magnetsüdamiku pikkus,
L_i — keskmise välijoone pikkus ikkes.

2-5. MASINA MAGNEETIMISKÕVER

Arvutades magneetimisergutuse mitmesugustele magnetvoo väärtustele, näiteks $0{,}5\Phi_0$, $0{,}75\Phi_0$, $1{,}0\Phi_0$, $1{,}15\Phi_0$, võime joonestada kõvera $\Phi_0 = f(F)$. Saadud kõverat nimetatakse masina magneetimiskõveraks. Konstantsel pöörlemiskiirusel on see kõver ühtlasi *tühijooksukõveraks*. Joonisel 2-8 on toodud magneetimiskõver nii kogu masinale kui ka kõverad üksikute magnetahela osade kohta.

Jooniselt 2-8 näeme, et masina magneetimiskõvera algosa on praktiliselt sirge. See seletub sellega, et väikese magnetvoo Φ_0 väärtuse korral on teras vähe küllastunud ning seega kogu magneetimisergutus kulub peamiselt õhupilule. Seepärast on õhupilule



Joon. 2-8. Alalisvoolumasina magneetimiskõver

vastav kõver $\Phi_0 = f(F_\delta)$ magneetimiskõvera puutujaks tema alguses.

Mida suurem on Φ_0, seda enam küllastub teras ja seda enam suureneb terasele kuluva magneetimisergutuse osatähtsus. Masina küllastuse aste avaldab tunduvat mõju masina omadustele. Küllastusastme üle võib otsustada lõikude *ab* ja *ac* suhte järgi.

Küllastuse hindamisel kasutatakse *küllastustegurit*

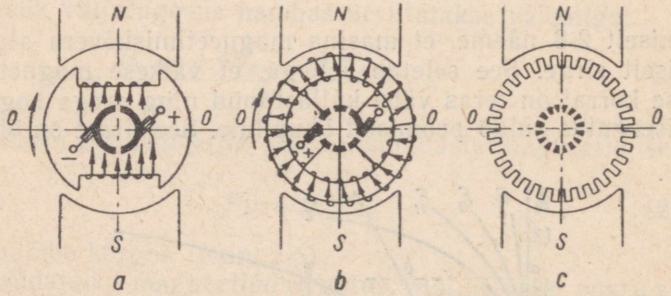
$$k_\mu = \frac{F}{F_s} = \frac{ac}{ab}. \qquad (2\text{-}26)$$

III PEATÜKK

ALALISVOOLUMASINATE ANKRUMÄHISED

3-1. ALALISVOOLUMASINA ANKUR JA SELLE MÄHIS

Alalisvoolumasina ankru konstruktsioon on olnud mitmesugune. Esimeseks ankruks oli kahekordse *T-kujuline* ankur (joon. 3-1, *a*). Sellist ankrut kasutatakse ka veel tänapäeval õige väikeste masinate, näiteks käsiinduktorite puhul. Järgmisena hakati kasutama *rõngasankrut* (joon. 3-1, *b*). See ankur omas rõngakujulise terassüdamiku, millele oli mähitud toroidikujuline mähis. Tänapäeval kasutatakse *silindrilist* ankrut (joon. 3-1, *c*).



Joon. 3-1. Alalisvoolumasina ankru tüüpe

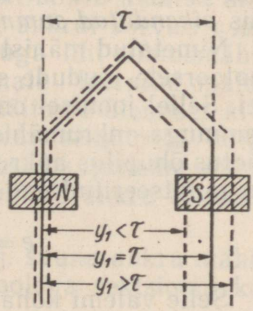
Nii rõngas- kui ka silindrilise ankru puhul koosneb ankru mähis üksikutest poolidest. Poolide otste vastava ühendamise teel kommutaatori lestadega saadakse kinniseks ahelaks suletud mähis. Põhiline erinevus rõngasankru ja silindrilise ankru mähiste vahel seisab mähise üksikute elementide ärakasutamises.

Rõngasankrus läbib masina põhimagnetvoog ankru terasrõngast, kuid ei läbi praktiliselt rõnga sees asuvat ruumi. Generaatori

puhul indutseeritakse emj. ainult neis mähise keerdude pooltes, mis asuvad ankru välispinnal (pooluste vastas). Keerdude teisi pooli, mis asuvad rõnga sisepinnal, ei kasutata ära ja nad on vaid välispinnal asuvate mähise aktiivsete poolte omavahelisteks ühendusteks. Seevastu silindrilise ankru mähis asub silindrilise terassüdamiku välispinnal asuvates uuretes, mistõttu ankru mähise keerdude mõlemad pooled asuvad magnetväljas ning neis indutseeritakse emj. Seega on silindrilise ankru keerdude mõlemad pooled aktiivsed ja silindrilise ankru mähis on täielikult ära kasutatud. Lähemalt käsitletakse silindrilise ankru mähise ühendamisviise allpool.

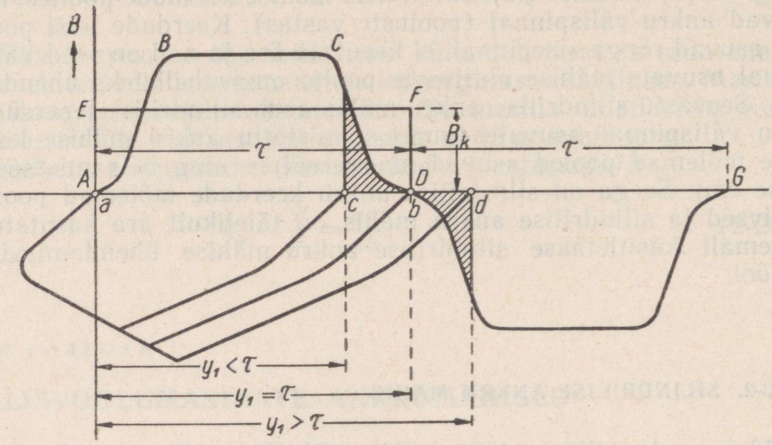
3-2. SILINDRILISE ANKRU MÄHIS

Alalisvoolumasina ankru mähise põhielemendiks on *sektsioon.* Sektsiooniks nimetatakse ankru mähise seda osa, mis on ühendatud kommutaatori kahe, mähkimise järjekorras üksteisele järgneva lesta külge. Sektsiooni külgi, milles indutseeritakse emj., nimetatakse *aktiivseteks.* Silindrilise ankru sektsioonil on kaks aktiivset külge, mis asuvad ankru uuretes. Väljaspool uurdeid asuvaid aktiivseid külgi omavahel ühendavaid mähiseosi nimetatakse *laupühendusteks.* Laupühendused asuvad ankru silindrilise südamiku otste kohal. Ankru pinnal uuretes asuva sektsiooni aktiivsetes külgedes indutseeritava emj. suund sõltub vastava külje asukohast masina magnetväljas (joon. 3-2). Et saada maksimaalset emj. ankrus, peavad sektsiooni küljed asuma nii, et nendes indutseeritavad elektromotoorsed jõud summeeruksid. Selle saavutamiseks peavad sektsiooni kaks külge asuma kumbki erineva pooluse kohal (joon. 3-2). Seega sektsiooni küljed peavad asuma ühele poolusejaotusele τ vastava ankru ümbermõõdu osa alguses ja lõpus. Kommutaatori töötamistingimuste parandamiseks asetatakse sektsiooni küljed mõnikord ankru ümbermõõdul poolusejaotusest τ veidi vähemale või suuremale kaugusele. Joonisel 3-2 on näidatud mähise sektsiooni asend tasapinnale laialilaotatud ankru pinnal, kusjuures samale joonisele on märgitud ka ankru vastas asuvate pooluste asend.



Joon. 3-2. Alalisvoolumasina ankru mähise sektsioonid

Sektsiooni laiust, s. o. sektsiooni külgede kaugust teineteisest ankru pinnal, nimetatakse ankru *mähise esimeseks sammuks* y_1. Ankru mähist, mille samm on võrdne poolusejaotusega ($y_1 = \tau$, joon. 3-2), nimetatakse *täis-* ehk *diametraalse sammuga mähiseks.*



Joon. 3-3. Induktsiooni jaotus õhupilus

Kui $y_1 < \tau$, siis on tegemist *lühendatud sammuga*, ja kui $y_1 > \tau$, siis *pikendatud sammuga* mähisega.

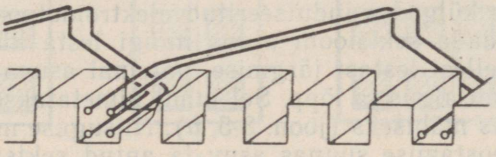
Nimetatud mähiste sektsioonide külgedes indutseeritud elektromotoorsete jõudude suurusest saame ettekujutuse joonise 3-3 alusel. Sellel joonisel on näidatud tasapinnale laotatult mitmesuguse sammuga ankrumähiste sektsioonid *ab*, *ac*, *ad* ning induktsiooni *B* jaotus õhupilus ankru kohal poolusejaotuse τ ulatusel. Nagu teada, on indutseeritud emj. väärtus avaldatav valemiga.

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}. \qquad (3\text{-}1)$$

Selle valemi kohaselt on emj. võrdeline sektsiooniga aheldatud voo Ψ muutumise kiirusega. Joonisel 3-3 näeme, et täissammulise sektsiooniga *ab* on aheldatud kogu pooluse magnetvoog, kuna sektsiooniga *ac* ainult osa sellest. Sektsioon *ad* haarab ka osa kõrvalasuva vastasnimelise pooluse voost, mistõttu selle sektsiooniga aheldatud summaarne voog on väiksem.

Silindrilise ankru mähise sektsioonid asetatakse ankru pinnal asuvatesse uuretesse. Kui asetada kõik sektsioonid ühte tasapinda, siis laupühenduste ristumise tõttu tekib raskusi nende ärapaigutamisel. Et seda vältida, asetatakse sektsioonid kahte tasapinda (kihti) (joon. 3-4). Sektsiooni aktiivset külge, mis asub ankru välispinnale lähemal, nimetatakse ülemiseks, uurde põhjas asuvat kihti aga alumiseks.

Sõltuvalt mähise sektsioonide kommutaatori lestadega ühendamise viisist ja nende kujust liigitatakse ankru mähised *liht-silmus-*, *liht-laine-*, *mitmekordseteks silmus-* ja *mitmekordseteks lainemähisteks.*



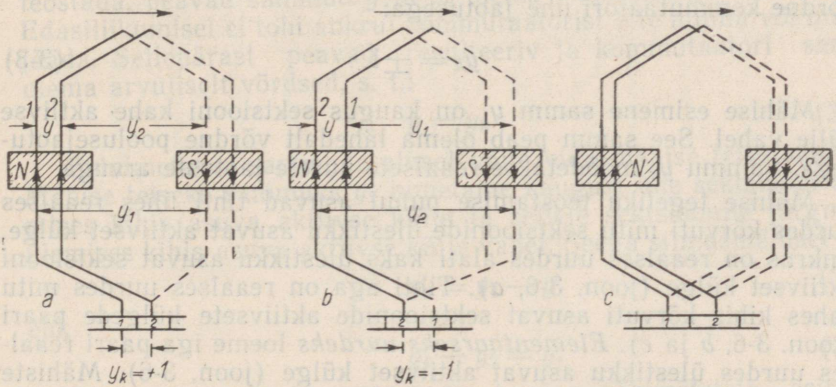
Joon. 3-4. Ankru mähise sektsiooni asetus ankru uuretes

Lihtmähised moodustavad ankrul alati ühe suletud juhtmete ahela, kuna mitmekordsed mähised võivad moodustada ühe või mitu sellist süsteemi. Esimesel juhul nimetatakse mitmekordset mähist *ühekäiguliseks*, teisel juhul *mitmekäiguliseks*.

3-3. LIHT-SILMUSMÄHIS

Liht-silmusmähiseks nimetatakse niisugust ankru mähist, mille sektsiooni algus ja lõpp on ühendatud kahe, ankrul kõrvuti asuva lesta külge. Joonisel 3-5 on näha ühe keeruga liht-silmusmähise sektsioonide asend. Lepime kokku tasapinnale laotatud mähise skeemide joonestamisel, et pideva joonega näitame ülemises kihis asuvat ja kriipsjoonega alumises kihis asuvat sektsiooni külge. Skeemil näidatud mähise kohal asuvad poolused kujutleme mähise ees asuvaina. Nool mähise joonise kohal näitab ankru liikumise suunda liikumatute pooluste suhtes.

Kasutades parema käe reeglit, leiame emj. suuna ankru mähise sektsioonide külgedes (joonisel näidatud noolega sektsiooni kül-



Joon. 3-5. Liht-silmusmähise sektsioonid:
a — ristita parempoolne; *b* — ristiga vasakpoolne; *c* — kahe keeruga sektsioon

jel). Et sektsiooni küljed asuvad erinimeliste pooluste all, siis liituvad nendes külgedes indutseeritud elektromotoorsed jõud.

Kui ühendada sektsiooni algus mingi lesta külge ning sektsiooni lõpp sellest lestast järgmise, paremal asuva lesta külge, ei ristu sektsiooni algus ja lõpp. Sel juhul nimetatakse mähist *ristita parempoolseks* mähiseks (joon. 3-5, *a*). Niisuguse mähise puhul on mähkimise teostamise suunas asuv ja antud sektsioonile järgnev sektsioon eelmisest paremal. Kui aga ühendada sektsiooni lõpp vasakul asuva lesta külge, ristuvad sektsiooni algus ja lõpp. Niisugune on *ristiga vasakpoolne* mähis (joon. 3-5, *b*). Nüüd asub järgmine sektsioon vasakul pool eelmisest. Üldjuhul võib sektsioon koosneda mitmest (joon. 3-5, *c*) keerust. Tähistame sektsiooni keerdude arvu w_c.

Mähise ühendamisel kinnitatakse kommutaatori iga lesta külge ühe sektsiooni lõpp ja järgneva algus. Sellepärast vastab igale sektsioonile üks kommutaatori lest. Kui S on sektsioonide arv ja K kommutaatori lestade arv, siis:

$$S = K. \tag{3-2}$$

Et ankrule mähis õigesti peale asetada, peab täitma rida nõudeid. Selleks tuleb määrata mähise sammud ankrul ja kommutaatoril.

Mähist iseloomustavateks sammudeks on:

a) mähise samm kommutaatoril ehk *kommutaatori samm* y_k;

b) mähise esimene samm ankrul y_1;

c) mähise *resulteeriv samm* ankrul y.

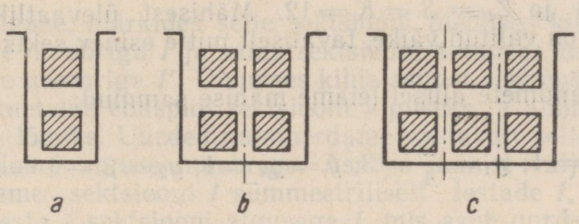
Sammud y_1 ja y määravad mähise *teise sammu* y_2.

Kommutaatori samm y_k on võrdne nende kommutaatori lestade vahelise kaugusega, mille külge on ühendatud mingi sektsiooni algus ja lõpp. Kommutaatori sammu mõõdetakse kommutaatori lestade jaotuste arvuga. Liht-silmusmähise kommutaatori samm on võrdne kommutaatori ühe jaotusega:

$$y_k = \pm 1. \tag{3-3}$$

Mähise esimene samm y_1 on kaugus sektsiooni kahe aktiivse külje vahel. See samm peab olema lähedalt võrdne poolusejaotusega. Sammu y_1 mõõdetakse reaalsete uurete jaotuste arvuga.

Mähise tegeliku teostamise puhul asuvad tihti ühes reaalses uurdes kõrvuti mitu sektsioonide ülestikku asuvat aktiivset külge. Ankrus on reaalses uurdes alati kaks ülestikku asuvat sektsiooni aktiivset külge (joon. 3-6, *a*). Tihti aga on reaalses uurdes mitu kahes kihis kõrvuti asuvat sektsioonide aktiivsete külgede paari (joon. 3-6, *b* ja *c*). *Elementaarseks uurdeks* loeme iga paari reaalses uurdes ülestikku asuvat aktiivset külge (joon. 3-6). Mähiste uurimisel on otstarbekas mõõta sammu y_1 elementaarsete uurete jaotuste arvuga.



Joon. 3-6. Reaalsed uurded:
a — ühe, *b* — kahe ja *c* — kolme elementaarse uurdega

Kuna igale sektsioonile vastab üks kommutaatori lest, siis elementaarsete uurete arv

$$Z_{el} = S = K. \tag{3-4}$$

Iga pooluse kohta on elementaarsete uurete arv $\frac{Z_{el}}{2p}$, kus p — pooluspaaride arv. Mähise esimene samm y_1 saab olla vaid täisarv, nagu see järgneb eeltoodud definitsioonist. Seepärast iga silindrilise mähise esimene samm

$$y_1 = \frac{Z_{el}}{2p} \mp \varepsilon = \text{täisarv}, \tag{3-5}$$

kus ε on niisugune lihtmurd, mille võrra vähendades (—) või suurendades (+) sektsiooni laiust saab täita eeltoodud tingimust.

Mähise skeemis üksteisele järgnevate sektsioonide ülemises või alumises kihis asuvate aktiivsete külgede kaugus, mõõdetuna elementaarsete uurete jaotustes, on mähise resulteeriv samm (joon. 3-5).

Mähist teostades liigume kommutaatoril sammu y_k ja samal ajal ankrul resulteeriva sammu y võrra edasi. Et mähist õigesti teostada, peavad sammud y ja y_k olema teineteisega kooskõlas. Edasiliikumisel ei tohi ankrul kommutaatorist ette minna või maha jääda. Sellepärast peavad resulteeriv ja kommutaatori samm olema arvuliselt võrdsed, s. t.:

$$y = y_k. \tag{3-6}$$

Eelnimetatud sammude alusel võib leida mähise teise sammu. Mähise teiseks sammuks y_2 nimetame kaugust ühe sektsiooni alumises kihis asuva aktiivse külje ja sellele sektsioonile järgneva ülemises kihis asuva aktiivse külje vahel. Seega silmusmähisel

$$y_2 = y_1 - y \tag{3-7}$$

ehk

$$y_1 - y_2 = y. \tag{3-8}$$

Tuginedes nendele mähise teostamise põhimõtetele, esitame järgnevalt liht-silmusmähise radiaalse tasapinnale laotatud skeemi,

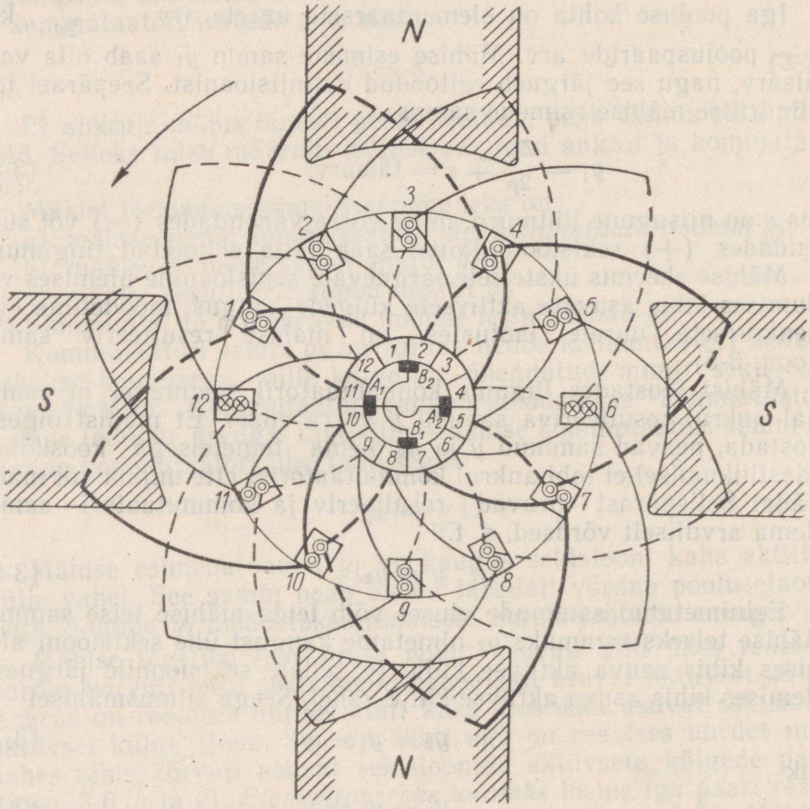
kui $2p = 4$ ja $Z_{el} = S = K = 12$. Mähisest ülevaatlikuma pildi saamiseks on valitud väike, tavaliselt mitte esinev sektsioonide arv (joon. 3-7).

Antud andmete alusel leiame mähise sammud:

$$y_k = 1;\ y_1 = \frac{12}{4} = 3;\ y = y_k = 1;\ y_2 = 3 - 1 = 2.$$

Mähise skeemi joonestamisel on väga oluline õigesti nummerdada kommutaatori lestad, neile vastavad sektsioonide küljed ja elementaarsed uurded. Mähis joonestatakse sektsioonidega, millel on üks keerd.

Nummerdame järjekorras kommutaatori lestad, liikudes mööda kommutaatorit kellaosuti liikumise suunas. Alustades mähise teostamist kommutaatori lestalt *1*, ühendame selle külge esimese

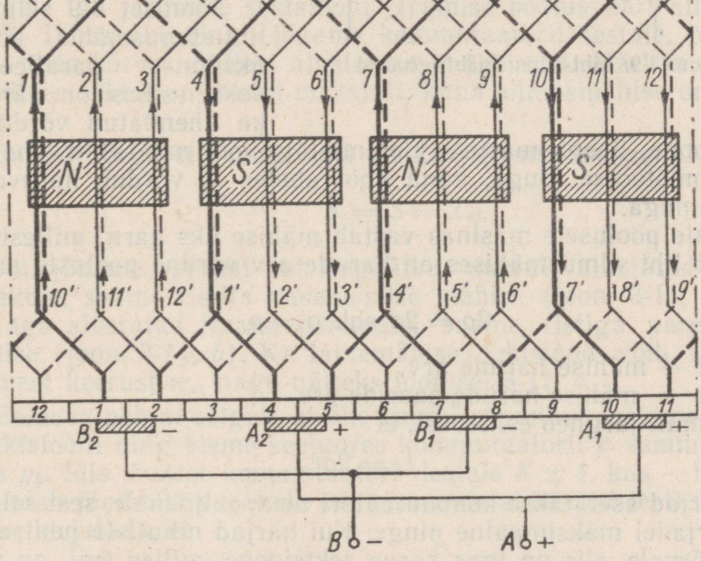


Joon. 3-7. Radiaalne liht-silmusmähis silindrilisel ankrul, kui $2p = 4$ ja $Z_{el} = S = K = 12$

sektsiooni alguse, märkides selle sektsiooni ülemises kihis asuva aktiivse külje numbriga *1* ja sama sektsiooni alumises kihis asuva aktiivse külje numbriga *1'*. Ülemises kihis asuvat sektsiooni aktiivset külge nimetame edaspidi sektsiooni alguseks ja alumises asuvat külge — lõpuks. Uurded nummerdame vastavalt selles uurdes asuva sektsiooni alguse numbriga. Asudes mähist välja joonestama, asetame sektsiooni *1* sümmeetriliselt lestade *1*, *2* suhtes. Ühendame lesta *1* sektsiooni algusega *1*, mis asub uurde *1* ülemises kihis, ning sama sektsiooni lõpu *1'* asetame uurde *4* põhja, s. o. esimese sammu $y_1 = 3$ võrra algusest nihutatult. Esimese sektsiooni lõpu *1'* ühendame kommutaatori lesta *2* külge, s. o. kommutaatori sammu $y_k = +1$ võrra lestast *1* edasi jne. Kasutatava nummerdamisviisi korral on kommutaatori lesta, sektsiooni ja elementaarse uurde numbrid samad.

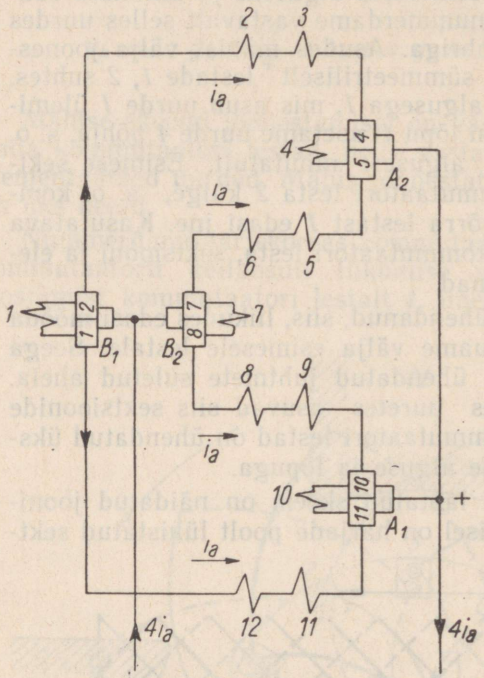
Kui oleme mähise õigesti ühendanud, siis, liikudes edasi mööda ankrut ja kommutaatorit, jõuame välja esimesele lestale. Seega moodustab mähis järjestikku ühendatud juhtmete suletud ahela. Samuti märkame, et kõikides uuretes asuvad siis sektsioonide aktiivsed küljed ning kõik kommutaatori lestad on ühendatud üksteisele järgnevate sektsioonide alguse ja lõpuga.

Sama mähise tasapinnale laotatud skeem on näidatud joonisel 3-8. Mõlemal mähise joonisel on harjade poolt lühistatud sekt-



Joon. 3-8. Silmusmähise laotatud skeem

sioonid näidatud tugevama joonega. Parema ettekujutuse saamiseks mähise sektsioonide ühendusviisist on sama mähis kujutatud veel joonisel 3-9 järjestikku ühendatud sektsioonide kaupa.



Joon. 3-9. Liht-silmusmähise harud

Jälgides joonisel 3-8 näidatud mähises indutseeritud emj. suunda ning harusid moodustavaid poole, näeme, et elektromotoorsed jõud igas harus liituvad. Kuna üksikutes harudes asuvad sektsioonid on kõikides harudes pooluste suhtes samas asendis, siis harudes tekkivad elektromotoorsed jõud on võrdsed. Märkame, et harude asendi ruumis määrab harjade asend kommutaatoril. Nihutades harjasid, nihkuvad ka harud. Ankru pöörlemisel siirduvad ankru mähise sektsioonid ühest mähise harust teise, olles ülemineku hetkel lühistatud harjade poolt.

Joonisel 3-9 selgub, et liht-silmusmähis koosneb üksikutest paralleelharudest, milles on järjestikku ühendatud võrdne arv sektsioone. Seega masina klemmipinge on määratud ühe haru elektromotoorse jõuga, kuna vool ahelas I_a võrdub haruvoolude i_a summaga.

Igale poolusele masinas vastab mähise üks haru, millest järgneb, et liht-silmusmähises on harude arv võrdne pooluste arvuga, s. o.

$$2p = 2a \text{ ehk } a = p, \tag{3-9}$$

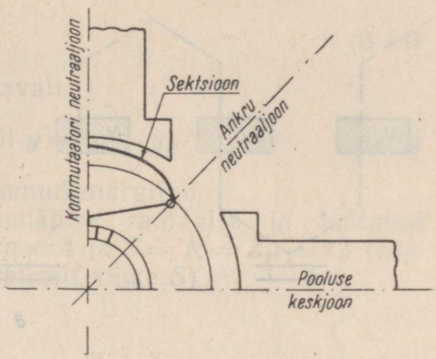
kus $2a$ — mähise harude arv,
a — mähise harude paaride arv.

Samuti järgneb eelnevast, et

$$I_a = 2ai_a. \tag{3-10}$$

Harjad asetatakse kommutaatori neutraaljoonele, sest sel juhul on harjadel maksimaalne pinge. Kui harjad nihutada neutraaljoonelt kõrvale, siis on igas harus sektsioone, milles emj. on vastupidise suunaga. Seega väheneb harjadel olev pinge. Harjade

polaarsus on joonisel 3-8 määratud masina töötamisel generaatorina, kus ankur liigub pooluste suhtes joonisel noolega näidatud suunas. Ühesuguse polaarsusega harjad ühendatakse omavahel juhtmetega. Viimaste külge ühendatakse vooluahela väline osa.



Joon. 3-10. Neutraaljoone asend ankrul ja kommutaatoril

Neutraaljoone asend tegelikul ankrul ja kommutaatoril ei ühti ruumis. Ankru neutraaljoon asub kahe naaberpooluse vahekohas (joon. 3-10), kuna neutraaljoon kommutaatoril asub pooluse keskjoone kohal. See on tingitud vajadusest asetada ankru mähise sektsioon sümmeetriliselt kommutaatori lestade suhtes.

3-4. LIHT-LAINEMÄHIS

Lainemähis koostatakse samuti kui silmusmähiski ühe sektsiooni lõpu ühendamise teel järgneva sektsiooni algusega. Kuid teostades mähist, liigume ankru ja kommutaatori pinnal nii, et asetame iga järgmise sektsiooni järgmise pooluspaari alla (joon. 3-11). Tehes ühe ringi, jõuame kommutaatoril lestale, mis asub selle lesta kõrval, millest alustasime mähkimist. Märkame, et lainemähise sektsiooni otsad on laiali, kuna silmusmähise omad olid koos.

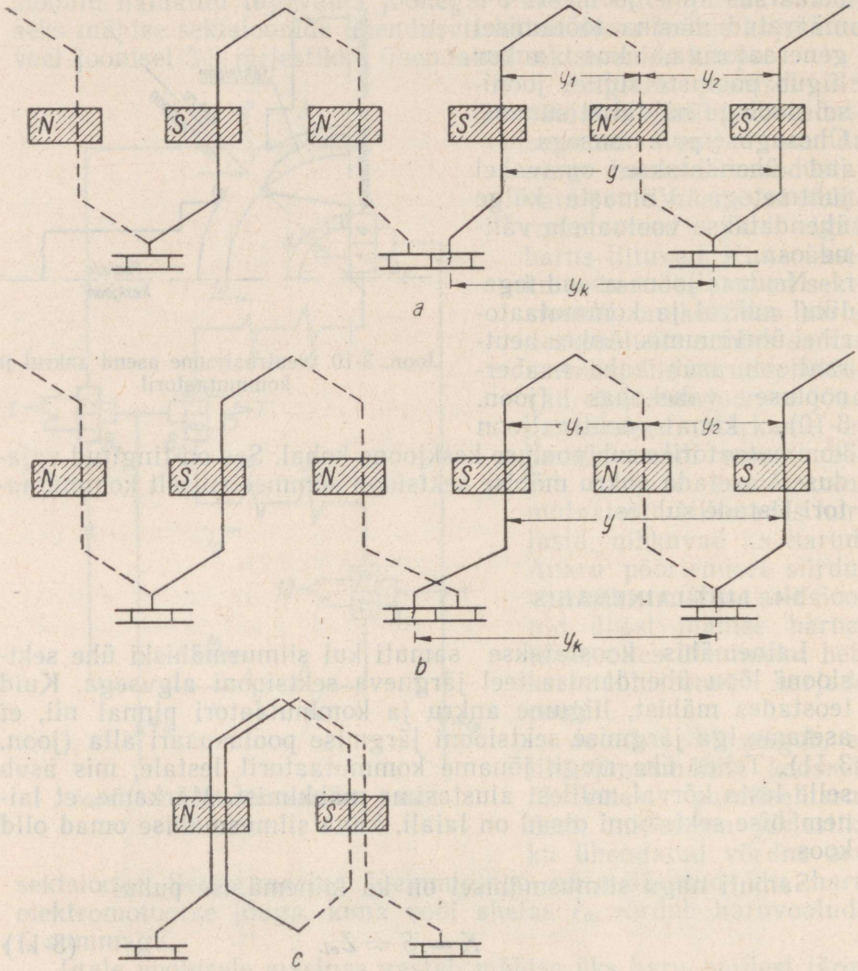
Samuti nagu silmusmähisel on ka lainemähise puhul

$$K = S = Z_{el}. \qquad (3\text{-}11)$$

Kui jõuame pärast üht ringkäiku ankrul alustatud lestast vasakule, saame ristita vasakpoolse mähise (joon. 3-11, *a*). Jõudes aga alustatud lestast paremale, saame ristiga parempoolse mähise (joon. 3-11, *b*). Ka lainemähise sektsioon võib koosneda mitmest keerust w_c, nagu näiteks joonisel 3-11, *c*.

Eelneva põhjal selgub, et ühe ringkäigu puhul asetame ankrule p sektsiooni ning teeme seejuures kommutaatoril p sammu pikkusega y_k. Siis jõuame kommutaatori lestale $K \mp 1$, kus -1 või $+1$ tähendab jõudmist vasakule või paremale alustatud lestast. Seega võime kirjutada, et

$$py_k = K \mp 1,$$



Joon. 3-11. Liht-lainemähise sektsioonid:
a — ristita vasakpoolne; *b* — ristiga parempoolne; *c* — kahe keeruga sektsioon

millest

$$y_k = \frac{K \mp 1}{p}. \qquad (3\text{-}12)$$

Kuna y_k peab olema täisarv (vt. p. 3-3), siis igasugune K ei sobi.

Lainemähise esimene ja resulteeriv samm määratakse samuti kui silmusmähisel. Seega

$$y_1 = \frac{Z_{el}}{2p} \mp \varepsilon \qquad (3\text{-}13)$$

ja

$$y_k = y. \tag{3-14}$$

Mähise teine samm y_2 on vastavalt

$$y_2 = y - y_1 \text{ või } y = y_1 + y_2. \tag{3-15}$$

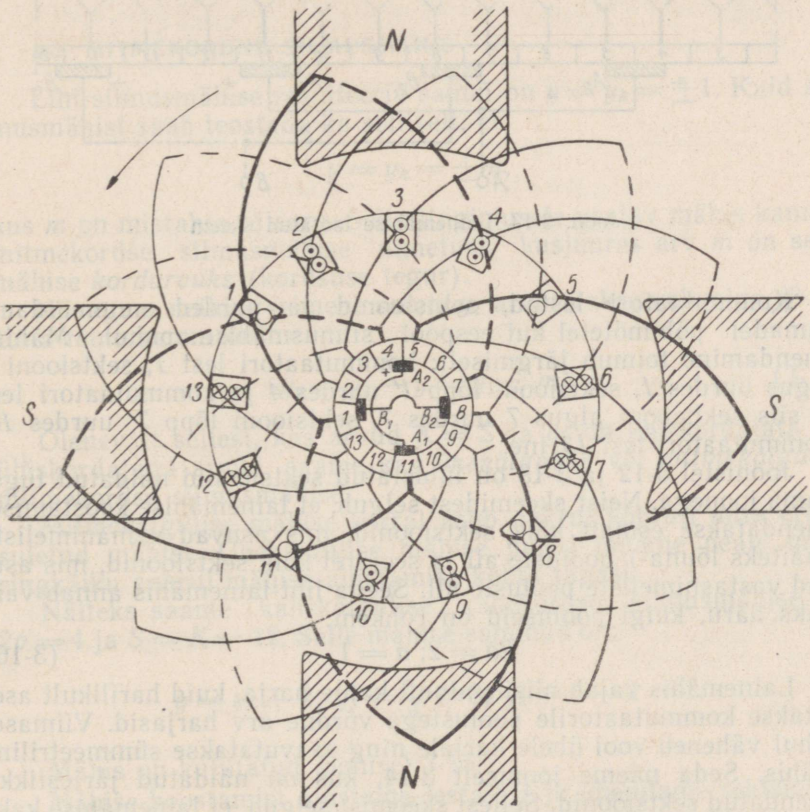
Joonisel 3-11 on vastavad sammud märgitud.

Esitame järgnevalt liht-lainemähise radiaalse ja laotatud skeemi (joon. 3-12 ja 3-13), kui $2p = 4$ ja $S = K = Z_{el} = 13$ (ülevaatlikkuse mõttes võetud ebatavaliselt väike S).

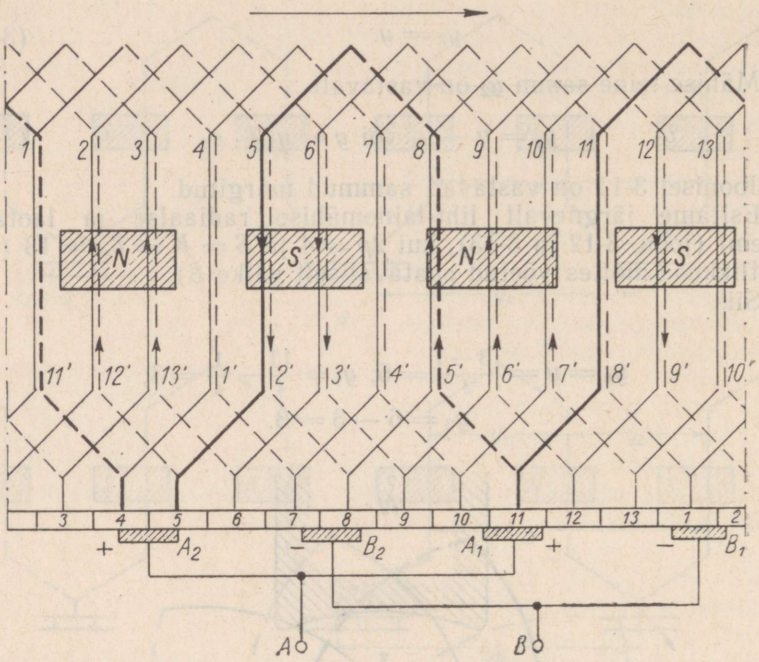
Siis

$$y_k = y = \frac{13 - 1}{2} = 6;\ y_1 = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3;$$

$$y_2 = 6 - 3 = 3.$$



Joon. 3-12. Radiaalne liht-lainemähis silindrilisel ankrul, kui $2p = 4$ ja $Z_{el} = S = K = 13$



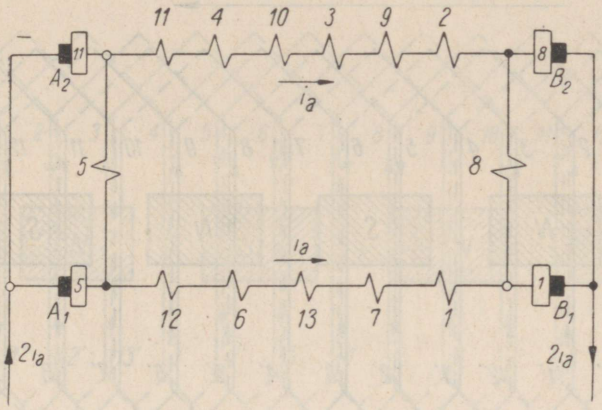
Joon. 3-13. Lainemähise laotatud skeem

Kommutaatori lestad, sektsioonid ja uurded nummerdame samadel põhimõtetel kui eespool silmusmähise puhul. Mähise ühendamine toimub järgmiselt: kommutaatori lest *1*, sektsiooni *1* algus uurdes *1*, sektsiooni lõpp *1'* uurdes *4* ja kommutaatori lest *7*, siis sektsiooni algus *7* uurdes *7*, sektsiooni lõpp *7'* uurdes *10*, kommutaatori lest *13* jne.

Joonistel 3-12 ja 3-13 on lühistatud sektsioonid näidatud tugevama joonega. Neist skeemidest selgub, et lainemähise koostamisel ühendatakse esmalt kõik sektsioonid, mis asuvad samanimeliste (näiteks lõuna-) pooluste all ja seejärel kõik sektsioonid, mis asuvad vastasnimeliste pooluste all. Seega liht-lainemähis annab vaid kaks haru, kuigi pooluseid on rohkem:

$$2a = 2;\ a = 1. \qquad (3\text{-}16)$$

Lainemähis vajab niisiis ainult kahte harja, kuid harilikult asetatakse kommutaatorile poolustega võrdne arv harjasid. Viimasel juhul väheneb vool ühele harjale ning saavutatakse sümmeetriline mähis. Seda näeme jooniselt 3-14, kus on näidatud järjestikku ühendatud sektsioonid. Sellest skeemist selgub, et lainemähise kaks haru on omavahel ühendatud lühistatud sektsioonide kaudu (joonisel 3-14 sektsioonid *5* ja *8*).



Joon. 3-14. Liht-lainemähise harud

3-5. MITMEKORDNE SILMUSMÄHIS

Liht-silmusmähise resulteeriv samm on $y = y_k = \pm 1$. Kuid silmusmähist saab teostada ka selliselt, et

$$y = y_k = \pm m,$$

kus m on mistahes täisarv. Selle tingimusele vastav mähis kannab mitmekordse silmusmähise nimetust, kusjuures arv m on selle mähise *kordarvuks* (kordsuse tegur).

Niisuguse mähise esimene samm y_1 arvutatakse valemiga (3-5), kuna teine samm on

$$y_2 = y_1 - y = y_1 \mp m. \qquad (3\text{-}17)$$

Olenevalt sellest, kas arvud $K = S$ ja y_k on ühiskordajata või ühiskordajaga arvud, saame kas *ühekäigulise* või *mitmekäigulise* mitmekordse silmusmähise.

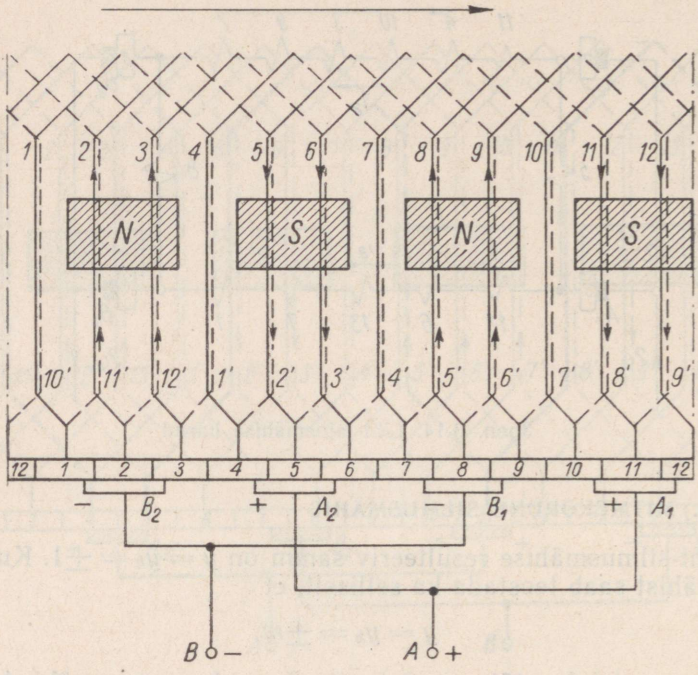
Mitmekäigulise mähise korral asub ankrul kõrvuti mitu eraldi suletud mähist. Ühekäigulise mähise puhul jõuame peale mitut ringkäiku ankrul mähise alustamise kohta tagasi.

Näiteks saame kahekäigulise kahekordse silmusmähise kui $2p = 4$ ja $S = K = 12$. Selle mähise sammud on:

$$y = y_k + 2;\ y_1 = \frac{12}{4} = 3;\ y_2 = 3 - 2 = 1.$$

Mähis on kujutatud joonisel 3-15.

Mähise koostamist alustame lestast *1* ja ühendame sektsioonid paarituarvuliste lestade külge, sest $m = +2$. Nii saame ühe suletud mähise. Samale ankrule saab aga asetada paarisarvuliste les-



Joon. 3-15. Kahekordne kahekäiguline silmusmähis, kui $2p = 4$, $S = K = 12$ ja $m = +2$

tade külge veel teise suletud mähise, mis elektriliselt on esimesest eraldatud.

Iga üksik mähis on seejuures tavaline liht-silmusmähis, mille harude arv võrdub pooluste arvuga. Seega on kogu ankru mähisel kokku $2a = 2 \cdot 2p = 2 \cdot 4 = 8$ haru. Üldiselt, kui $y_k = m$, siis

$$2a = m \cdot 2p \text{ ehk } a = mp. \qquad (3\text{-}18)$$

Harjade arv kommutaatoril on siin võrdne samuti pooluste arvuga $2p$, kuid iga hari peab olema laiem kui lest, et mõlemad mähised üheaegselt töötaksid, olles seega ühendatud harjade kaudu teineteisega paralleelselt.

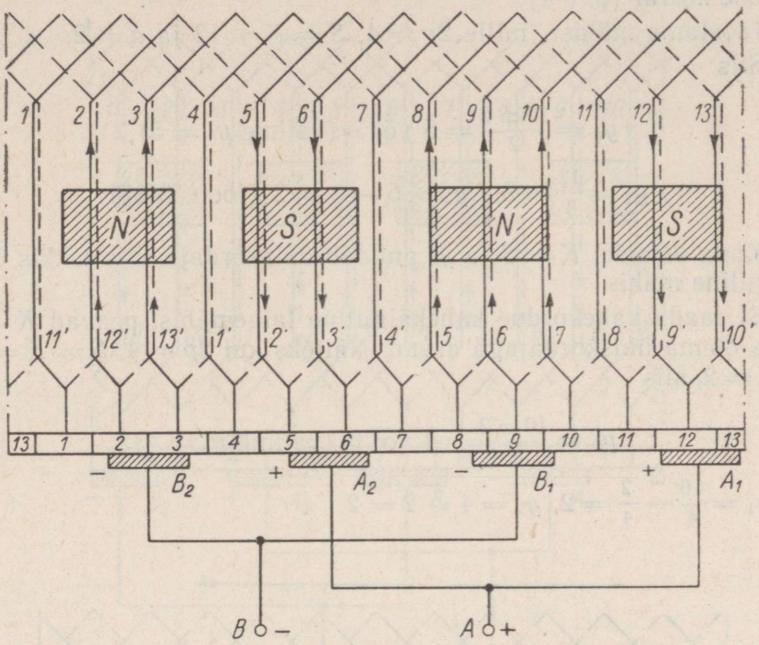
Kui $K = S = 13$ ja $y_k = 2$, $2p = 4$, siis tekib ühekäiguline kahekordne silmusmähis.

Selle mähise sammud on järgmised:

$$y = y_k = +2;\ y_1 = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3;\ y_k = 3 - 2 = 1.$$

Mähise skeem on antud joonisel 3-16.

Selle mähise teostamisel tuleb ankrul teha kaks ringkäiku, kuni mähis sulgub. Nagu allpool selgub, ei ole ühekäiguline kahekordne



Joon. 3-16. Kahekordne ühekäiguline silmusmähis, kui $2p = 4$, $S = K = 13$ ja $m = +2$

silmusmähis sümmeetriline. Sellele vaatamata kasutatakse niisuguseid mähiseid suure võimsusega masinates.

Et mitmekordne silmusmähis omab suure arvu harusid, siis sobib seda kasutada tugeva vooluga, näiteks elektrolüüsi otstarbeks ehitatavais masinais.

3-6. MITMEKORDNE LAINEMÄHIS

Mitmekordse lainemähise saame siis, kui pärast üht ringkäiku ankrul jõuame 2, 3, ... m jaotust eemale kommutaatori lestast, millest alustasime. Niisugusel korral saame mähise, mille harude arv

$$2a = 2m \text{ ehk } a = m, \tag{3-19}$$

kuna ankrul on nüüd 2, 3 ... m üksikut lainemähist.

Resulteeriv samm ja ka samm kommutaatoril

$$y = y_k \frac{K \mp m}{p} = \frac{K \mp a}{p}. \tag{3-20}$$

Mähise ülejäänud sammud leiame samuti kui liht-lainemähise korral (p. 3-4).

Teostame mähise, mille $2p = 4$, $S = K = 12$ ja $a = 2$.

Siis

$$y_k = \frac{12 \mp 2}{2} = 5 \text{ või } 7 \text{ (valime } y_k = 5),$$

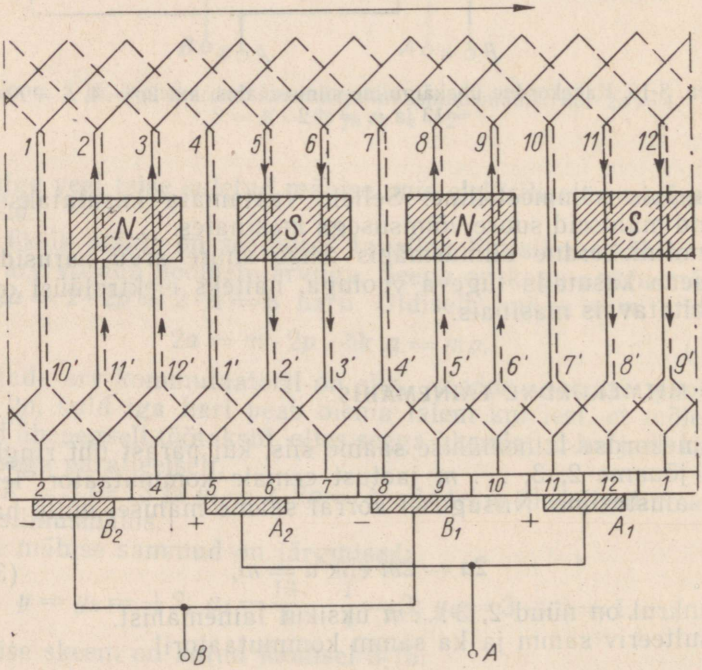
$$y_1 = \frac{12}{4} = 3, \quad y_2 = 5 - 3 = 2 \text{ (joon. 3-17).}$$

Kuna arvudel $K = S$ ja y_k puudub ühiskordaja, siis tekkis ühekäiguline mähis.

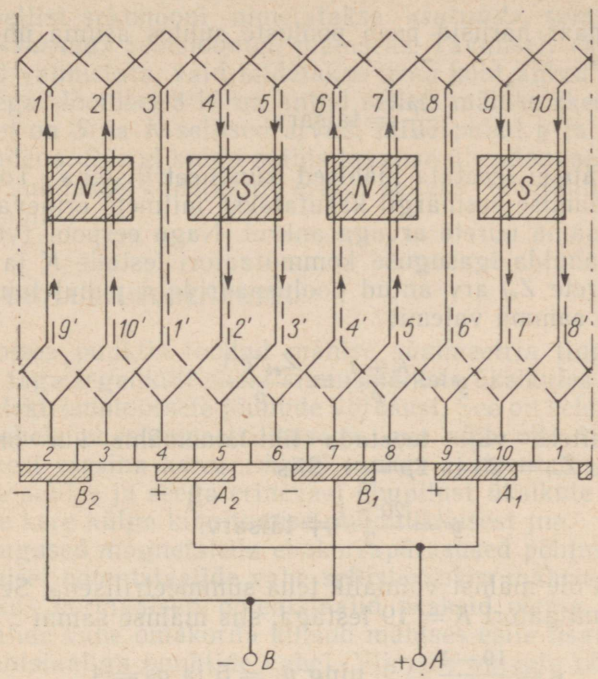
Et saada kahekordne kahekäiguline lainemähis, peavad $K = S$ ja y_k olema ühiskordajaga arvud. Näiteks kui $2p = 4$, $S = K = 10$ ja $a = 2$, siis

$$y_k = \frac{10 \mp 2}{2} = 4 \text{ või } 6 \text{ (valime } y_k = 4);$$

$$y_1 = \frac{10}{4} - \frac{2}{4} = 2, \; y_2 = 4 - 2 = 2.$$



Joon. 3-17. Kahekordne ühekäiguline lainemähis, kui $2p = 4$, $S = K = 12$ ja $m = 2$



Joon. 3-18. Kahekordne kahekäiguline lainemähis, kui $2p = 4$, $S = K = 10$ ja $m = 2$

See mähis on kujutatud joonisel 3-18.

3-7. MÄHISTE SÜMMEETRIA TINGIMUSED

Nagu eelnevast selgus, koosneb iga silindrilise ankru mähis a paarist harust. Seega võib kujutleda, nagu koosneks alalisvoolumasin a paralleelselt töötavast kahe paralleelharuga elementaarsest masinast. Et paralleeltöö teostuks soodsaimas olukorras, peab mähis vastama niisugustele tingimustele, mis tagaksid paralleelselt töötavate elementaarsete masinate täieliku sümmeetria.

Sümmeetria tingimused on järgmised:

1) iga paar harusid peab koosnema ühesuurusest sektsioonide arvust, s. o.

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \text{täisarv}; \qquad (3\text{-}21)$$

2) iga paar harusid peab asuma võrdses arvus uuretes, s. o.

$$\frac{Z}{a} = \text{täisarv;} \qquad (3\text{-}22)$$

3) iga paar harusid peab pooluste suhtes asuma ühesuguses asendis, s. o.

$$\frac{2p}{a} = \text{täisarv.} \qquad (3\text{-}23)$$

Mitte alati ei teostata mähised sümmeetrilistena. Tootmiskulude vähendamise eesmärgil kasutatakse mitmete erinevate masinate jaoks sama uurete arvuga ankrut. Nagu eespool (vt. p. 3-4) selgus, ei rahulda igasuguse kommutaatori lestade K ja elementaarsete uurete Z_{el} arv antud pooluspaaride p puhul lainemähise resulteeriva sammu valemit

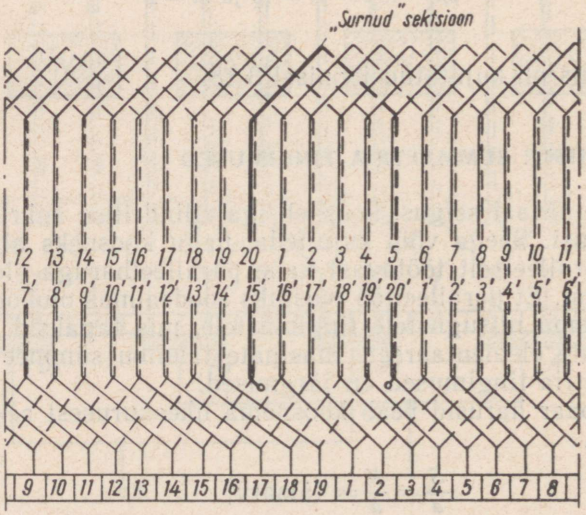
$$y = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{Z_{el} \mp 1}{p}.$$

Olgu näiteks vaja teostada liht-lainemähis, kui on olemas ankur, mille $Z_{el} = 20$ ja $2p = 4$. Siis

$$y = \frac{20 \mp 1}{2} \neq \text{täisarv.}$$

Seega ei ole mähist võimalik teha sümmeetrilisena. Sellepärast teeme kommutaatori $K = 19$ lestaga, siis mähise samm

$$y = \frac{19 - 1}{2} = 9, \text{ ning } y_1 = 5 \text{ ja } y_2 = 4.$$



Joon. 3-19. «Surnud» sektsiooniga mähis

Et ankrul on 20 uuret, siis jääb näiteks 20. uurde ülemises ja 5. uurde alumises kihis asuv sektsioon kommutaatoriga ühendamata. Sellist sektsiooni nimetatakse *«surnud»* sektsiooniks ja mähist *«surnud» sektsiooniga* mähiseks. Tavaliselt «surnud» sektsiooni ei valmistata, vaid täidetakse tema koht ankru uurdes puitvarrastega. Joonisel 3-19 on antud sellise mähise skeem.

Vahel on S ja K sellised arvud, mille puhul y ja y_k ei avaldu täisarvudena. Siis ei sulgu mähis tavalise ühendamise tulemusena, vaid ta suletakse kunstlikult eraldi selleks ettenähtud ühendusjuhtme abil.

3-8. ÜHTLUSTUSÜHENDUSED

Eelmises punktis toodud mähise sümmeetria tingimuste täitmine ei taga tegelikult siiski silmusmähiste üksikutes harudes tekkivate elektromotoorsete jõudude võrdsust. See on seletatav masina magnetahela ebasümmeetrilisusega, mis võib olla tingitud valutühemikest masina keres (ikkes), ankru ekstsentrilisest asetusest pooluste suhtes ja seega erinevast õhupilust üksikute pooluste all, pooluste kere külge kinnitamise puudulikkusest jne.

Niisugused magnetahela ebakorrapärasused põhjustavad ankru pöörlemisel potentsiaalide vahe selliste ankru mähise eri punktide vahel, kus normaalselt potentsiaalid peaksid olema võrdsed. Potentsiaalide vahe omakorda kutsub mähises esile lisavoolu mähise eri potentsiaaliga punktide vahel. Viimane asjaolu põhjustab harjade ja harude ebaühtlase koormuse.

Nimetatud vool, nn. *ühtlustusvool* $I_ü$ põhjustab lisakoormuse mähises ja harjadel, tekitab ankrus lisakadusid ning halvendab masina kommutaatori töötamise tingimusi.

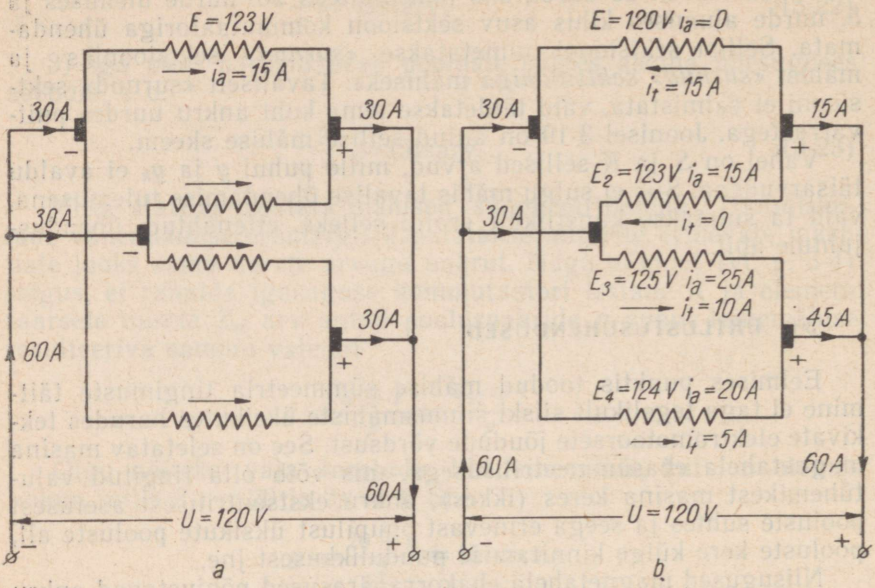
Toome järgnevalt näite eelneva selgitamiseks. Olgu alalisvoolugeneraatori ankru mähis nelja haruga $2a = 4$ (joon. 3-20, *a*), Generaatori klemmipinge olgu 120 V, ankru mähise takistus 0,05 Ω, ankru vool 60 A. Seega generaatori emj.

$$E = U + I_a r_a = 120 + 60 \cdot 0{,}05 = 123 \text{ V}.$$

Kuna harusid on neli, siis sümmeetrilise mähise puhul igas harus oleks vool $i_a = \frac{I_a}{4} = \frac{60}{4} = 15$ A ja iga haru takistus $r_a \cdot 2a = 0{,}05 \cdot 4 = 0{,}2$ Ω.

Oletame nüüd, et ülalnimetatud põhjustel ankru harude elektromotoorsed jõud on erinevad, s. o. alates ülemisest harust (joon. 3-20, *b*) on emj. 120, 123, 125 ja 124 V. Et generaatori klemmipinge hoitakse konstantne (120 V) ja ankru takistus on endine, siis kogu ankru keskmine emj. jääb samuti endiseks, s. o. 123 V.

Seega tekib üksikutes harudes erinevate elektromotoorsete jõu-



Joon. 3-20. Voolu jaotus ankrus sümmeetrilise (*a*) ja ebasümmeetrilise (*b*) magnetahela puhul

dude tõttu potentsiaalide vahed ja vastavalt nendes harudes ühtlustusvoolud.

Ülemises harus on emj. 120 V, mis on ankru elektromotoorsest jõust 3 V väiksem. Seetõttu tekib selles harus ühtlustusvool vastusuunas selle haru voolule, suurusega $\frac{3}{0{,}2} = 15$ A (joon. 3-20, *b*). Seega on selles harus resulteeriv vool 0. Järgmise haru emj. on võrdne ankru elektromotoorse jõuga ning ühtlustusvool on võrdne nulliga. Kolmandas harus on emj. 2 V suurem kui ankru oma ja seega tekib selles harus haruvooluga samasuunaline ühtlustusvool $\frac{2}{0{,}2} = 10$ A, andes selles harus resulteeriva voolu $15 + 10 = 25$ A. Neljandas harus on ühtlustusvool 20 A ja resulteeriv vool 5 A.

Nagu nähtub, on nüüd ankru positiivsed harjad ebaühtlaselt koormatud: ülemine hari alakoormatud (15 A), alumine ülekoormatud (45 A) (joon. 3-20, *b*).

Kaod on ankru sümmeetrilise ja ebasümmeetrilise magnetahela puhul samuti erinevad. Sümmeetrilise magnetahela puhul kaod

$$p_a = 2ai_a^2 r_a = 4 \cdot 15^2 \cdot 0{,}2 = 180 \text{ W}.$$

Ebasümmeetrilise magnetahela puhul aga

$$p_a = 15^2 \cdot 0{,}2 + 25^2 \cdot 0{,}2 + 20^2 \cdot 0{,}2 =$$
$$= 45 + 125 + 80 = 250 \text{ W}.$$

Viimasel juhul on kaod 39% suuremad.

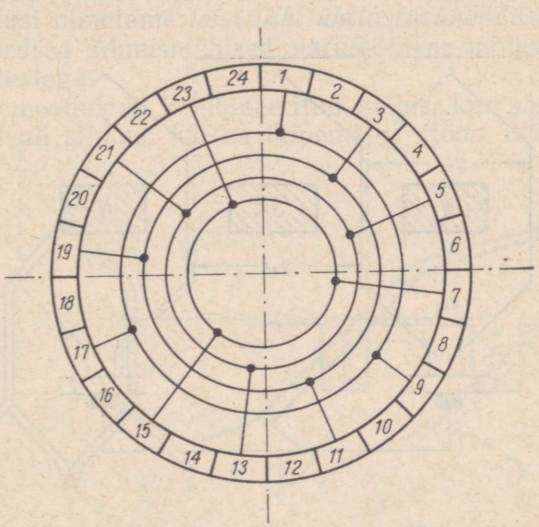
Ülaltoodud ebasoovitavate nähtuste vältimiseks tuleb teoreetiliselt sama potentsiaali omava ankru mähise punktid omavahel ühendada väikest takistust omavate vaskjuhtmetega. Neid ühendusjuhtmeid nimetatakse *esimest liiki ühtlustusühendusteks (ühtlustajad)*. Ankru mähise iga kahe haru kohta on antud potentsiaaliga punkte ainult üks ja seega a harude paariga ankru mähises on teatud potentsiaaliga punktide arv n_y:

$$n_y = a. \tag{3-24}$$

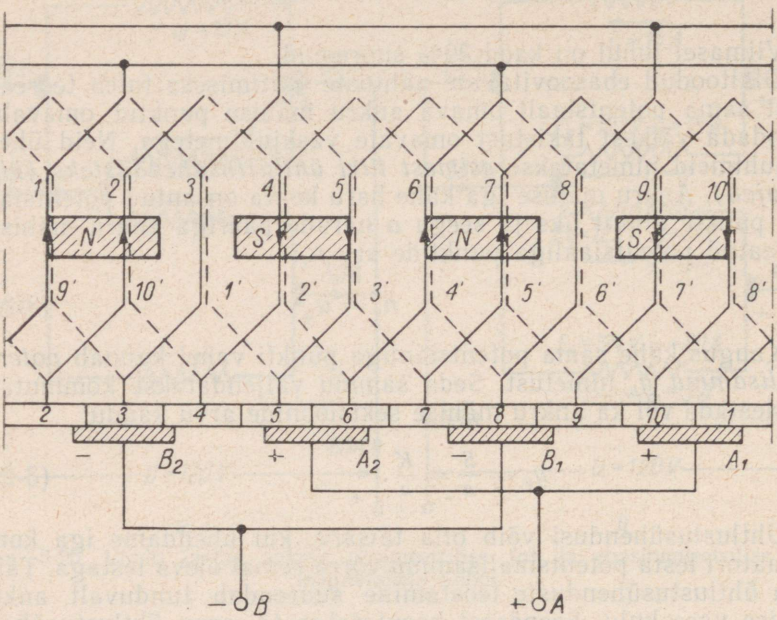
Kaugus kahe sama potentsiaaliga punkti vahel kannab *potentsiaalisammu* y_y nimetust. Seda sammu väljendatakse kommutaatori lestade või ka ankru mähise sektsioonide arvu kaudu:

$$y_y = \frac{S}{a} = \frac{K}{a}. \tag{3-25}$$

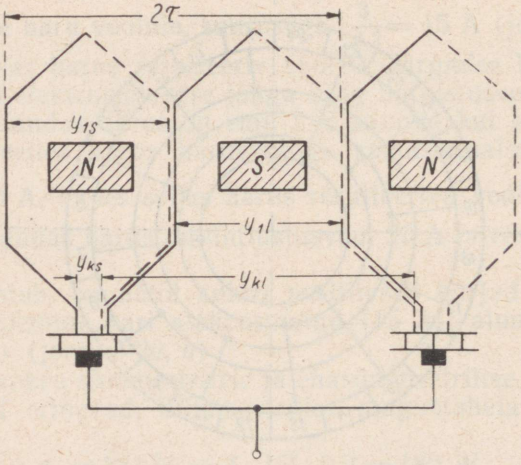
Ühtlustusühendusi võib olla täisarv, kui ühendame iga kommutaatori lesta potentsiaalisammu võrra eemal oleva lestaga. Täisarvu ühtlustusühenduste teostamine suurendab tunduvalt ankru mähise vase kulu. Seepärast kasutatakse täisarvu ühtlustusühendusi ainult rasketes tingimustes töötavais suure võimsusega masinais, nagu alalisvoolu-turbogeneraatorid, valtspinkide mootorid



Joon. 3-21. Ühtlustusühendused, kui $a = 3$, $Z = 24$ ja $y_y = {}^{24}/_{3} = 8$



Joon. 3-22. Teist liiki ühtlustusühendused ankrul, kui $2p = 4$, $S = K = 10$, $a = 2$ ja $y_y = {}^{10}/_{2} = 5$



Joon. 3-23. Kombineeritud mähise sektsioon

jne. Enamasti aga teostatakse üks ühtlustusühendus iga uurde kohta, s. o. $\frac{Z}{a}$ või $\frac{Z}{2a}$ ühtlustusühenduste gruppi (joon. 3-21).

Ühtlustusühendustes tekib vahelduvvool, millest tingitud magnetväljad püüavad magnetilist ebasümmeetriat vähendada.

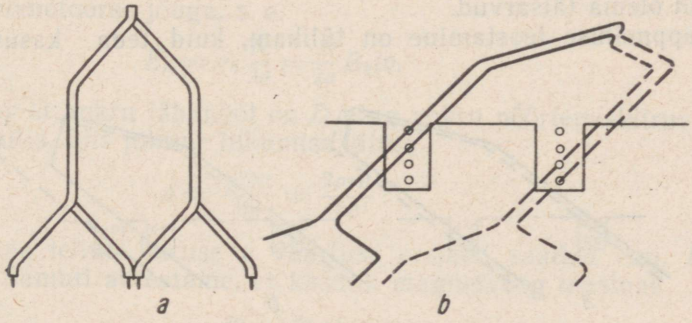
Ühtlustusühendused paigutatakse tegelikult kas ankru kommutaatoripoolsesse otsa või vastaspool asuvate laupühenduste kohale (joon. 3-22).

Lainemähised ei vaja eespoolnimetatud ühtlustusühendusi, sest nende mähiste üksikuid harusid moodustavad sektsioonid asuvad ankru ümbermõõdul, järelikult kõigi, nii tugevama kui ka nõrgema magnetvooga pooluste all. Liht-lainemähises ei saagi ühtlustusühendusi kasutada.

Nagu eespool selgus, koosnevad mitmekordsed lainemähised mitmest kõrvutiasuvast liht-lainemähisest. Selleks et kõik mähised töötaksid, peavad harjad katma mitut kõrvuti asuvat kommutaatori lesta. Harjade kaudu jaguneb vool vastavalt kõikidele lihtmähistele. Kuid harjade ebaühtlase üleminekutakistuse tõttu ei jagune tavaliselt vool nende mähiste vahel ühtlaselt. Mitmesugustel põhjustel võib harjade üleminekutakistus ühele paralleelselt ühendatud mähisele olla suurem kui teisele. See aga põhjustab mähise paralleelselt ühendatud üksikute osade (liht-lainemähiste) ebaühtlast koormust, põhjustades häireid kommutaatori töötamises. Ülaltoodu vältimiseks ühendatakse omavahel liht-lainemähiste punktid, mille potentsiaalid peaksid olema võrdsed. Ka nende punktide potentsiaalisamm arvutatakse valemiga (3-25). Joonisel 3-22 on toodud selliste ühtlustusühenduste skeem. Niisuguseid ühtlustusühendusi nimetame *teist liiki ühtlustusühendusteks.*

Mitmekordsed silmusmähised varustatakse mõlemat liiki ühtlustusühendustega.

Eri liigi moodustab kombineeritud mähis, kus samale ankrule on asetatud nii silmus- kui ka lainemähis (joon. 3-23).



Joon. 3-24. Kombineeritud mähise sektsioon:
a — asetus uurdes; *b* — sektsiooni kuju

Niisuguse mähise mõlemad nimetatud osad peavad omama ühepalju paralleelharusid ja keerde. Üks mähis on teise mähise ühtlustusühendusteks, millega jääb ära eraldi ühtlustusühenduste vajadus. Selline mähis asub uurdes neljas (joon. 3-24) kihis ning tema üksik sektsioon meenutab väliselt konna. Sellepärast mõnikord nimetatakse sellist mähist *«konn»-mähiseks.*

3-9. MÄHISTE TEGELIK TEOSTAMINE

Alalisvoolumasina ankru ühes uurdes võib asuda mitu paari ülestikku asuvat sektsiooni külge (vaata p. 3-3 joon. 3-6). Reaalsete uuretega arvestades peab mähise esimene samm olema

$$y_{1n} = \frac{Z}{2p}, \tag{3-26}$$

kus Z — reaalsete uurete arv.

Asetades sektsioonid reaalsetesse uuretesse, võib esineda:

a) ühelaiuste sektsioonidega mähis (joon. 3-25, *a*) ja

b) *treppmähis* (astmeline mähis), kus mingi kahe sektsiooni algused asuvad ühes uurdes, lõpud aga erinevates, kõrvutiasuvates uuretes (joon. 3-25, *b*).

Ühelaiuste sektsioonidega mähise puhul

$$y_{1n} = \frac{y_1}{n_a} = \text{täisarv}, \tag{3-27}$$

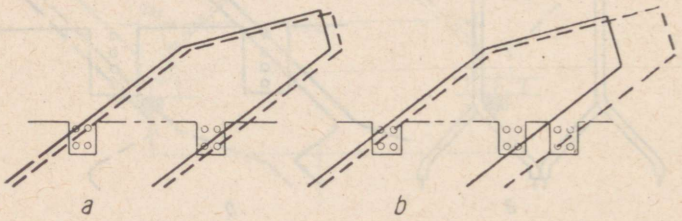
kus n_a — elementaarsete uurete arv reaalses uurdes.

Treppmähise puhul

$$\frac{y_1}{n_a} \neq \text{täisarv}.$$

Seega treppmähis omab reaalsetes uuretes kaks sammu, millest üks on väiksem ja teine suurem kui $\frac{y_1}{n_a}$, kusjuures mõlemad peavad olema täisarvud.

Treppmähise teostamine on tülikam, kuid teda kasutatakse



Joon. 3-25. Ühelaiuste sektsioonidega mähis (*a*) ja treppmähis (*b*) ankrul

siiski mõnel juhul kommutaatori töötamistingimuste parandamiseks.

Alalisvoolumasinate ankru uurete kuju on enamasti nelinurkne (joon. 1-12), kuid väikese võimsusega masinais vahel ka trapetsikujuline.

Mähise sektsioonid kui ka üksikud juhtmed isoleeritakse omavahel ja uurde suhtes. Juhtmed omavad enamasti nelinurkse ristlõikepinna, mis võimaldab uurde ruumi hästi ära kasutada. Väikese võimsusega masina mähise juhtmetena kasutatakse ka ümarjuhtmeid. Kinnistes uuretes mähis kinnitatakse puitkiiluga (joon. 1-12) ja lahtistes uuretes ankru pinnale mähitud terastraadist bandaažidega.

Mõnikord on uurded ankru võlli telgjoone suhtes kaldu. See abinõu vähendab väikese ankru uurete arvu puhul peapooluste magnetvoo pulseerimist.

3-10. ALALISVOOLUMASINA ANKRU MÄHISE ELEKTROMOTOORNE JÕUD

Määrame alalisvoolumasina ankru mähise elektromotoorse jõu tühijooksul, kui harjad asuvad neutraaljoonel ja mähise esimene samm $y_1 = \tau$.

Asendame poolusejaotuse ulatusel induktsiooni jaotuse trapetsikujulise kõvera sama alusega nelinurgaga. Joonisel 3-3 asendame pinna $ABCD$ pinnaga $AEFD$. Siis on saadud nelinurga kõrgus võrdne keskmise induktsiooniga B_k pooluse kohal.

Elektromagnetilise induktsiooni seaduse alusel keskmine emj. e_k ühes ankru juhtmes

$$e_k = B_k l v.$$

Kui ankrule on asetatud N juhet, siis igas ankru harus on järjestikku ühendatud $\frac{N}{2a}$ juhet. Masina emj. on aga määratud ühe haru elektromotoorse jõuga, s. o.

$$E_a = e_k \frac{N}{2a} = \frac{N}{2a} B_k l v.$$

Oletame, et ankru läbimõõt on D ning ankru pöörlemiskiirus n pööret minutis. Siis juhtme liikumise kiirus

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{2p\tau n}{60}.$$

Asendame leitud kiiruse v väärtuse eespool saadud emj. E_a valemisse. Samuti arvestame, et kasulik magnetvoog masinas

$$\Phi = B_k \tau l.$$

Nüüd leiame lõplikult ankru mähises indutseeritud emj.

$$E_a = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a} \Phi \text{ V}. \qquad (3\text{-}28)$$

Kui valemit kasutada valmisehitatud masina puhul, siis suurus

$$\frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a} = C_e$$

on konstantne ja emj.

$$E_a = C_e \Phi n. \qquad (3\text{-}29)$$

Lühendatud sammuga mähise emj. on aga väiksem, nagu see oli mainitud eespool (p. 3-2). Samuti mõjub ka harjade nihutamine neutraaljoonelt, sest siis satub harjade vahele erinevate suundadega elektromotoorsed jõud, mille tulemus on sama mis sammu lühendamine.

Kuna mähise sammu lühendamise puhul ta vähe erineb poolusejaotusest τ, ning harjad tavaliselt asuvad neutraaljoonel, siis on eeltoodud valem (3-29) alati kasutatav.

3-11. ALALISVOOLUMASINATE ANKRUMÄHISTE KASUTUSALAD

Liht-silmusmähist kasutatakse peamiselt masinais võimsusega 50...500 kW ja pingega 150...500 V, kuid ka masinais võimsusega kuni 500 kW ja pingega üle 500 V.

Liht-lainemähis sobib masinaile võimsusega kuni 500 kW ja pingega üle 500 V.

Mitmekordne silmusmähis leiab kasutamist masinais pingega alla 24 V ja võimsusega kuni 50 kW, samuti võimsustel üle 500 kW pingele 150...500 V.

Mitmekordne lainemähis sobib võimsusele 50...500 kW ja pingele üle 500 V.

Kombineeritud mähist kasutatakse suurtes masinais võimsusega üle 500 kW.

IV PEATÜKK

ALALISVOOLUMASINA ANKRUREAKTSIOON

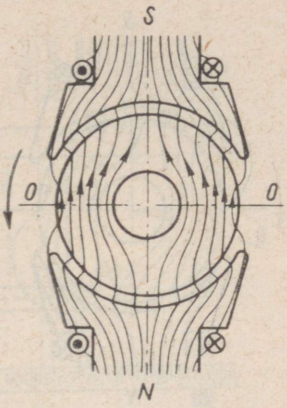
4-1. ALALISVOOLUMASINA MAGNETVÄLI KOORMUSEL

Alalisvoolumasina magnetväli on peapooluste magnetvälja ja ankru mähise voolu tõttu tekkiva ankru magnetvälja koosmõju tulemuseks.

Koormusel esineva ankru magnetvoo mõju peapooluste magnetvoole nimetatakse *ankrureaktsiooniks.*

Ettekujutuse saamiseks magnetvälja pildist koormusel kuju-

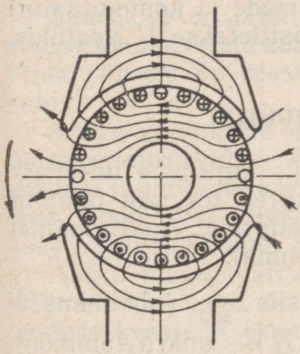
tame eraldi masina magnetvälja tühijooksul ning ankru magnetvälja koormusel. Mõlema magnetvälja koosmõjul saame siis masina resulteeriva magnetvälja koormusel. Lihtsuse mõttes vaatleme kahepooluselist masinat. Joonisel 4-1 on kujutatud masina magnetväli tühijooksul, mis on tekitatud voolust peapooluste mähises. Joonisel on näidatud pooluste mähise üks keerd, selles oleva voolu suund ning juhtmete ümber tekkiv magnetväli. Magnetväli on ankru geomeetrilise neutraaljoone suhtes sümmeetriline. Kui masin töötab generaatorina, siis ankru pöörlemisel joonisel näidatud suunas tekib ankru juhtmetes emj., mille suund on märgitud ankru juhtmetele.



Joon. 4-1. Peapooluste magnetväli masina tühijooksul

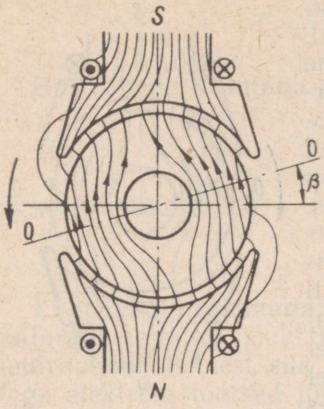
Koormusel tekib ankru juhtmetes vool, mille suund generaatoris ühtib juhtmetes tekkiva emj. suunaga, kuid mootoris on sellele vastupidine. Joonisel 4-2 on kujutatud sama masin, kusjuures on kujutatud ainult ankru juhtmetes koormusel tekkinud voolust tingitud ankru magnetväli.

Teatavasti tekib iga vooluga juhtme ümber magnetväli, mis on kujutatav magnetvälja joontega. Magnetvälja jooned vooluga juhtmete ümber kujutavad kinniseid kõveraid. Magnetvälja suund määratakse kruvireegli alusel. Samasuunalise vooluga kõrvuti asuvate juhtmete ümber tekib samasuunaline magnetväli. Joonisel 4-2 näidatud voolu suunad ankru mähise juhtmetes vastavad generaatorile, kui ankur pöörleb kellaosuti liikumise suunas, ja mootorile, kui ankur pöörleb kellaosuti liikumisele vastupidises suunas.


Joon. 4-2. Ankru magnetväli

Geomeetrilise neutraaljoonega pooleks jaotatud ankru mähise ülemise ja alumise ankru poole juhtmetes on voolud vastassuunalised. Seega on ankrus kaks vastassuunalise vooluga juhtmete gruppi, mille ümber tekivad vastavasuunalised magnetväljad (joon. 4-2). Ankru magnetvälja pilti vaadeldes selgub, et ankru välja telgjoon ühtub harjade joonega, kusjuures vasakul on põhja- ja paremal lõunapoolus.

Koormatud alalisvoolumasinas esinevad nii peapooluste kui ka ankru magnetväljad. Joonistel 4-1 ja 4-2 kujutatud väljade koosmõjul saamegi alalisvoolu-



Joon. 4-3. Alalisvoolumasina magnetväli koormusel

masina magnetvälja koormusel (joon. 4-3). Masina resulteeriv magnetväli moonutub, muutudes neutraaljoone suhtes ebasümmeetriliseks. Põhjapooluse vasaku poole ja lõunapooluse parema poole kohal on ankru ja peapooluste magnetväljad vastassuunalised ja seega resulteeriv väli siin nõrgeneb. Põhjapooluse parema poole ja lõunapooluse vasaku poole kohal aga vastavalt resulteeriv väli tugevneb.

Võttes arvesse ankru pöörlemise suunda masina töötamisel generaatorina või mootorina, võime järeldada, et generaatoris tugevneb resulteeriv magnetväli liikumise suunas asuva (mahajooksva) pooluse kinga poole all ning nõrgeneb pealejooksva pooluse kinga poole all. Mootoris on olukord aga vastupidine.

Masina magnetvälja moonutuse tõttu ei asu ankru keskkohta läbiv ja magnetvooga ristiolev neutraaljoon enam endises kohas, vaid on pöördunud teatava nurga β võrra (joon. 4-3) geomeetrilise neutraaljoone suhtes.

Koormusel tekkiva resulteeriva magnetvälja neutraaljoont nimetatakse *füüsikaliseks neutraaljooneks.*

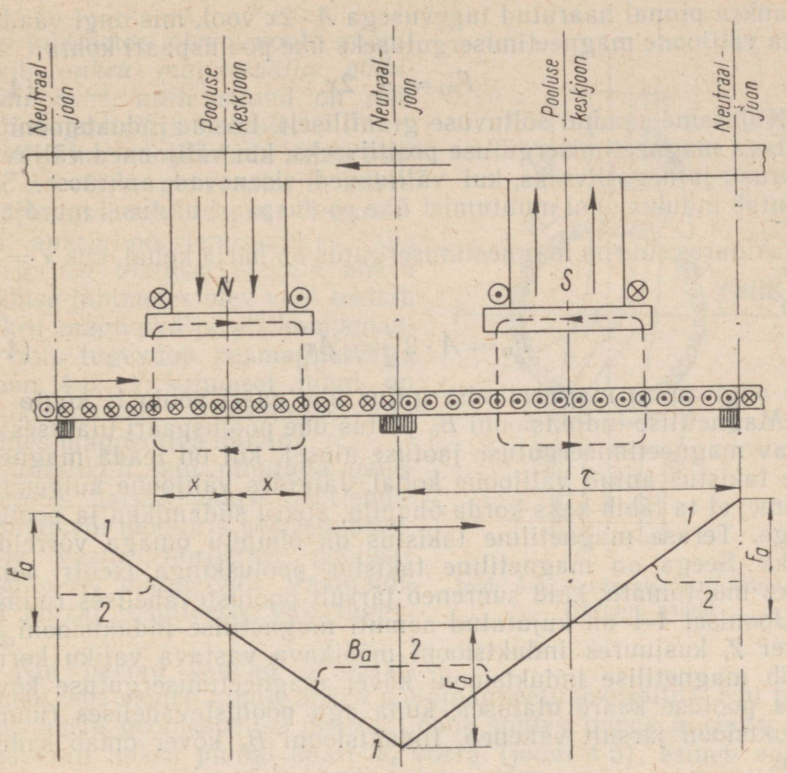
Füüsikaline neutraaljoon pöördub geomeetrilise neutraaljoone suhtes seda suurema nurga β võrra, mida tugevam vool on ankru mähises, s. t. mida suurem on koormus. Generaatoris pöördub neutraaljoon ankru pöörlemissuunas, mootoris — sellele vastu.

Kui harjad on geomeetrilise neutraaljoone kohal, tekib harjade poolt lühistatavates sektsioonides emj., sest need sektsioonid nüüd tegelikult ei asu enam neutraaljoonel. Emj. põhjustab lühistatavas sektsioonis lisavoolu, mis raskendab harjade ja kommutaatori töötamist. Kommutatsiooni parandamist käsitletakse V peatükis.

4-2. ANKRUREAKTSIOONI MAGNEETIMISERGUTUS

Ankru magneetimisergutuse arvutamiseks kujutame uuretega ankru asemel sileda pinnaga ankru, kusjuures tegeliku õhupilu laiuse δ asemel võtame arvutusliku õhupilu laiuse δ'. Ankru mähist kujutame seejuures ühtlase kihina ankru pinnal.

Ankru ümbermõõdu pikkusühikul asub siis $\frac{N}{\pi D}$ juhet, kus N on ankru mähise kõikide juhtmete arv ja D — ankru läbimõõt. Korrutades ankru ümbermõõdu pikkusühikul oleva juhtmete arvu



Joon. 4-4. Ankru magnetiline induktsioon ja magneetimisergutus

vooluga i_a nendes juhtmetes, leiame ankru *voolukatte A:*

$$A = \frac{Ni_a}{\pi D} \text{ A/m.} \qquad (4\text{-}1)$$

Suurus A on oluline masinat iseloomustav tegur. Tänapäeva alalisvoolumasinate ankru voolukate on 100 . . . 600 A/cm ja enamgi. Mida suurem on masina võimsus, seda suurem on tema voolukate.

Ankru voolukatte A kaudu võime avaldada ankru magnetvoo magneetimisergutuse F_a. Laotame nii ankru kui ka poolused tasapinnale ja näitame ankru pinnal ühtlase kihina ankru mähise juhtmed (joon. 4-4). Juhtmetele märgime ka voolu suunad. Harjad asugu neutraaljoonel ja mähise esimene samm olgu $y_1 = \tau$.

Ankru magnetvälja jooned ümbritsevad ühesuunalise vooluga juhtmeid (vt. joon. 4-2) ja nende välijoonte sümmeetriateljeks on pooluse keskjoon (joon. 4-4). Joonisel on kujutatud üks välijoon, mis asub kaugusel x pooluse keskjoonest. Kujutatud välijoone poolt

on ankru pinnal haaratud tugevusega $A \cdot 2x$ vool, mis ongi vaadeldava välijoone magneetimisergutuseks ühe pooluspaari kohta:

$$F_{ax} = A \cdot 2x. \qquad (4\text{-}2)$$

Kujutame saadud sõltuvuse graafiliselt. Loeme induktsiooni ja vastava magneetimisergutuse positiivseks, kui välijooned väljuvad ankrust, ja negatiivseks, kui välijooned sisenevad ankrusse. Siis kujutab induktsiooni muutumist ühe pooluspaari ulatusel murdjoon *1*, kusjuures suurim magneetimisergutus on harja kohal, kus $x = \frac{\tau}{2}$.

Siis

$$F_a = A \cdot 2\frac{\tau}{2} = A\tau. \qquad (4\text{-}3)$$

See ongi ankru magneetimisergutus ühe paari pooluste kohta.

Magnetilise induktsiooni B_a jaotus ühe pooluspaari ulatuses on leitav magneetimisergutuse jaotuse alusel, kui on teada magnetiline takistus antud välijoone kohal. Jälgides välijoone kulgemist, näeme, et ta läbib kaks korda õhupilu, ankru südamikku ja pooluskinga. Terase magnetiline takistus on õhupilu omaga võrreldes väike. Seega on magnetiline takistus pooluskinga tsentri ümbruses muutumatu, kuid suureneb järsult poolustevahelises ruumis.

Joonisel 4-4 on kujutatud samuti magnetilise induktsiooni B_a kõver *2*, kusjuures induktsiooni mõõtkava vastava valiku korral ühtib magnetilise induktsiooni kõver magneetimisergutuse kõveraga pooluse kaare ulatuses, kuna aga poolustevahelises ruumis induktsioon järsult väheneb. Induktsiooni B_a kõver omab sadula kuju.

4-3. ANKRUREAKTSIOONI KOMPONENDID

Alalisvoolumasina harjad võivad olla kas juhuslikult või sihilikult geomeetriliselt neutraaljoonelt ära nihutatud (nurk α joonisel 4-5).

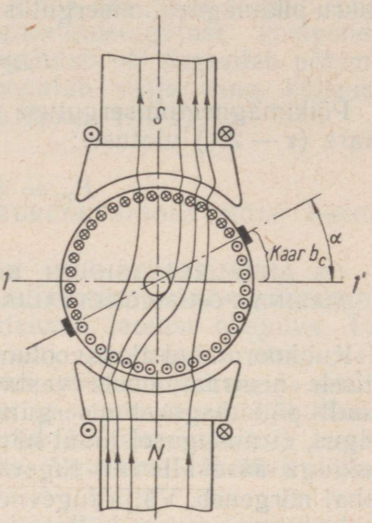
Pöörates harjasid, muudame voolujaotuse ankru mähise juhtmetes ebasümmeetriliseks geomeetrilise neutraaljoone (*1—1'*) ning pooluste keskjoone suhtes. Võib kujutleda, nagu koosneks niisugune ebasümmeetriline jaotus kahest sümmeetrilisest osast.

Joonisel 4-6 on näidatud ankru voolujaotuse sümmeetrilised komponendid. Joonisel 4-6, *a* on kujutatud ankrumähise need juhtmed, mis asuvad nurga 2α ulatusel, ja voolu suund neis juhtmetes, kui harjad on pööratud generaatoris ankru pöörlemissuunas (mootoris — vastupidi). Neis juhtmetes oleva voolu mõjul tekib *ankru magnetvälja pikikomponent*, mis on antud juhul vastu suunatud põhimagnetväljale ja nõrgendab seda. Seega pikikomponendi mõju masina magnetväljale on lahtimagneetiv. Joonisel 4-6, *b* on näidatud juhtmed, mis asuvad väljaspool nurka 2α. Nen-

des juhtmetes oleva voolu mõjul tekib *ankru magnetvälja põikikomponent*, mille suund on risti põhimagnetvälja suunale.

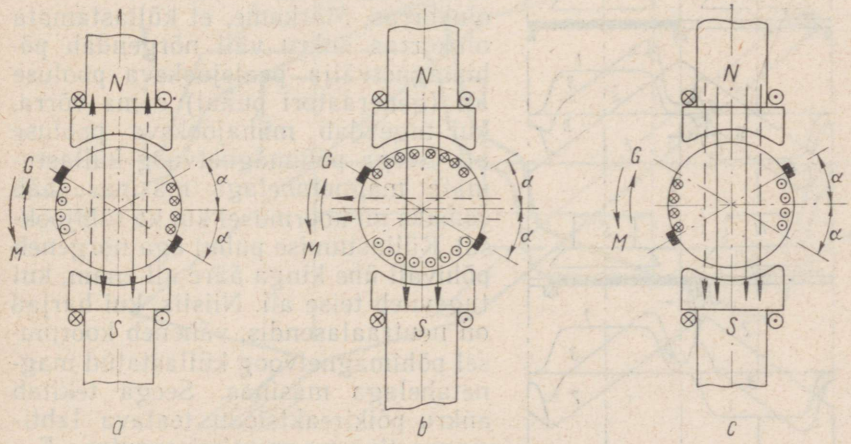
Kui harjad nihutada sama nurga α võrra generaatoris ankru pöörlemissuunale vastu või mootoris ankru pöörlemissuunas, siis nurga 2α ulatusel olevate ankru mähise juhtmetes olev vool tekitab ankru magnetvälja pikikomponendi, mis tugevdab peamagnetvälja (joon. 4-6, *c*). Viimasel juhul on pikikomponent peamagnetvälja suhtes magneetiva mõjuga.

Järelikult, kui nihutada generaatoris harjad ankru pöörlemissuunas või mootoris pöörlemissuunale vastu, nõrgeneb pooluste resulteeriv magnetväli. Vastupidisel korral resulteeriv väli tugevneb.



Joon. 4-5. Neutraaljoonelt nihutatud harjade asend

Kui harjad asuvad neutraaljoonel, siis esineb ainult ankru põikimagneetimisergutus. Kui pöörata harju geomeetrilise neutraaljoone suhtes nurga α võrra, või vastavalt ankru pinnal kaare b_c võrra (joon. 4-5), esineb ankru magneetimisergutuse nii põiki- kui ka pikikomponent. Kui harjad



Joon. 4-6. Ankrureaktsiooni piki- ja põikikomponendid:
a — nõrgendav pikikomponent; *b* — põikikomponent; *c* — tugevdav pikikomponent

on pööratud ankru kaare b_c ulatuses, siis vastavalt valemile (4-2) ankru pikimagneetimisergutus

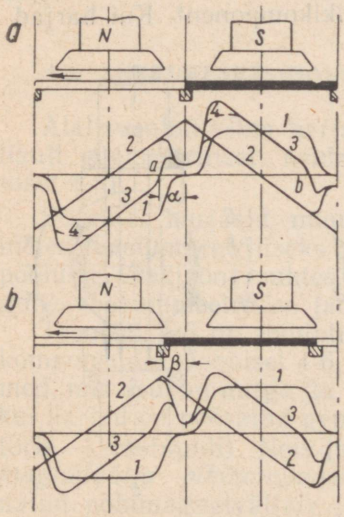
$$F_{ad} = 2Ab_c. \tag{4-4}$$

Põikimagneetimisergutuse tekitab ankru mähise osa, mis asub kaare $(\tau - 2b_c)$ ulatusel:

$$F_{aq} = A(\tau - 2b_c). \tag{4-5}$$

4-4. ANKRUREAKTSIOONI KOMPONENTIDE MÕJU ALALISVOOLUMASINA PÕHIMAGNETVÄLJALE

Kui koormatud alalisvoolumasina puhul jätame harjad geomeetrilisele neutraaljoonele vastavasse asendisse, siis tekib ankrus ainult põikimagneetimisergutus ja põikimagnetväli. Punktis 4-1 selgus, et niisugusel juhul näiteks generaatoris mahajooksva pooluskinga ääre all väli tugevneb, pealejooksva pooluskinga ääre kohal nõrgeneb. Välja tugevnemise tõttu pooluskinga ühe ääre all pooluskinga see osa küllastub magnetiliselt. Selle tulemusel suureneb selles kohas magnetiline takistus ja väheneb magnetiline induktsioon. Joonisel 4-7, *a* näeme induktsiooni jaotust pooluse kaare ulatusel koormusel, kui harjad asuvad geomeetrilise neutraaljoone kohal. Magnetilise induktsiooni kõver koormusel saadakse põhimagnetvoole vastava induktsiooni kõvera *1* ordinaatide ja ankru magnetvoo induktsiooni kõvera *2* ordinaatide liitmisel.



Joon. 4-7. Resulteeriva magnetilise induktsiooni jaotus

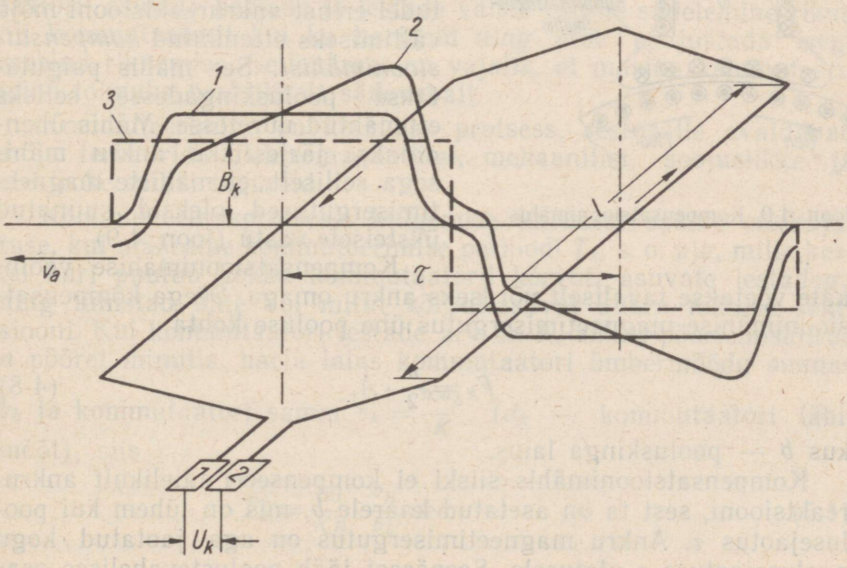
Samal joonisel kujutab kõver *3* induktsiooni jaotust küllastumata olukorras, kõver *4* aga küllastatud olukorras. Märkame, et küllastamata olukorras ankru väli nõrgendab põhimagnetvälja pealejooksva pooluse all (generaatori puhul) sama võrra, kui tugevdab mahajooksva pooluse all. Seega põhimagnetvoog küllastumata magnetahelaga masinas jääb samaks nii koormusel kui ka tühijooksul. Küllastumise puhul aga nõrgeneb põhiväli ühe kinga ääre all enam, kui tugevneb teise all. Niisiis, kui harjad on neutraalasendis, väheneb koormusel põhimagnetvoog küllastatud magnetahelaga masinas. Seega tekitab ankru põikireaktsioon teatava lahtimagneetiva magneetimisergutuse F_{qd}, millega tuleb arvestada masinate projekteerimisel.

Kui harjad on pööratud nurga β võrra, siis, nagu eespool selgus, tekib kaks ankrureaktsiooni magneetimisergutuse komponenti. Viimastest pikikomponent kas nõrgendab või tugevdab põhimagnetvälja, põikikomponent aga moonutab välja ning küllastuse puhul omab lahtimagneetivat mõju (joon. 4-7, *b*).

4-5. ALALISVOOLUMASINA ANKRUREAKTSIOONI MÕJU PINGETE JAOTUSELE KOMMUTAATORIL

Ankrureaktsioon mõjutab alalisvoolumasina põhimagnetvoogu, muutes magnetilise induktsiooni jaotust õhupilus. Tulemuseks on masinas indutseeritud emj. muutumine ning sellest tingitud generaatori pinge, mootori pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi muutumine. Ebaühtlase ja moonutatud induktsiooni jaotuse tõttu koormusel aga muutub ka kommutaatori lestadevahelise pinge jaotus ebaühtlaseks. Vaatleme lähemalt viimast nähtust.

Kommutaatoril kõrvuti asuvate lestade vaheline pinge on otseses sõltuvuses induktsiooni jaotusest õhupilus. Tõepoolest on pinge U_k kahe kommutaatoril kõrvuti asuva lesta *1* ja *2* (joon. 4-8) vahel võrdne (arvestamata pingelangu keerus) selles keerus (sektsioonis) indutseeritud elektromotoorse jõuga e_{12}. Indutseeritud emj. aga on võrdeline induktsioonile kohas, kus asub antud hetkel juhe. Seega magnetilise induktsiooni jaotuse kõver on ühtlasi vastavas



Joon. 4-8. Kõrvuti asuvate lestade vaheline pinge

mõõtkavas indutseeritud emj. kõveraks. Kui sektsiooni laius on võrdne poolusejaotusega τ, siis

$$U_k \approx e_{12} = 2Bl_i v_a. \tag{4-6}$$

Põikireaktsiooni tulemusel muutub induktsiooni jaotus ebaühtlaseks (kõver *2*, joon. 4-8). Vaatleme tingimusi, milles on sektsioon, mis satub maksimaalse induktsiooni kohale. Võrdleme kõrvuti asuvate lestade vahel maksimaalselt esineda võivat pinget $U_{k\,max}$, keskmisega (joon. 4-8, kõver *3*):

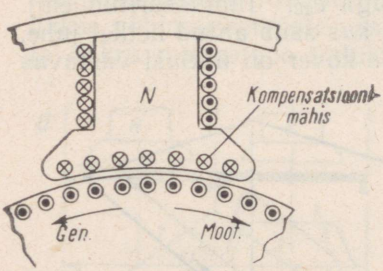
$$U_{k\,kesk} = 2B_k l_i v_a.$$

Selgub, et tegelikult teostatud masinais on suhe

$$\frac{U_{k\,max}}{U_{k\,kesk}} = 1{,}80 \ldots 1{,}85. \tag{4-7}$$

Nagu näitavad kogemused, töötab kommutaator veel häireteta, kui lestadevahelise pinge $U_k = 30 \ldots 50$ V. Arvestades ülalmainitut, peame kommutaatori lestade arvu valikul lähtuma nimetatud nõudest, arvestades ühtlasi ka ebaühtlast lestadevahelise pinge jaotust koormusel.

Suure võimsuse, kõrge pinge ja suure pöörlemiskiirusega alalisvoolumasinais on raske täita eeltoodud tingimust. Seepärast magnetvälja moonutuse vältimiseks koormusel, samuti kõrvuti asuvate lestade vahelise pinge vähendamiseks kasutatakse neil juhtudel erilist ankrureaktsiooni mõju vältimiseks ettenähtud *kompensatsioonimähist.* See mähis paigutatakse pooluskingadesse selleks ettenähtud uuretesse. Mähis ühendatakse järjestikku ankru mähisega selliselt, et mähiste magneetimisergutused oleksid suunatud üksteisele vastu (joon. 4-9).



Joon. 4-9. Kompensatsioonimähis

Kompensatsioonimähise voolukate võetakse tavaliselt võrdseks ankru omaga. Seega kompensatsioonimähise magneetimisergutus ühe pooluse kohta

$$F_k = \frac{b}{2} \cdot A, \tag{4-8}$$

kus b — pooluskinga laius.

Kompensatsioonimähis siiski ei kompenseeri täielikult ankrureaktsiooni, sest ta on asetatud kaarele b, mis on lühem kui poolusejaotus τ. Ankru magneetimisergutus on aga jaotatud kogu poolusejaotuse τ ulatusele. Seepärast jääb poolustevahelises osas

ankrureaktsioon osaliselt kompenseerimata, mis aga olulist mõju pingete jaotusele kommutaatoril ei avalda.

Kompensatsioonimähis on tavaliselt valmistatud varrastest. Kompensatsioonimähis teeb alalisvoolumasina töötamise tunduvalt kindlamaks, kuid suurendab tunduvalt ka masina hinda, mistõttu ta leiab kasutamist ainult suurtes ja rasketes tingimustes töötavatel masinatel.

V PEATÜKK

ALALISVOOLUMASINA KOMMUTEERIMINE

5-1. KOMMUTEERIMISPROTSESSI OLEMUS

Alalisvoolumasina ankru pöörlemisel puutuvad kommutaatori lestad kokku liikumatute harjadega. Olenevalt harja laiusest, puutub hari üheaegselt kokku ühe või mitme lestaga ning lühistab lestadega ühendatud ankrumähise ühte või mitut sektsiooni. Lühistatud sektsiooni otsad ühendatakse kokku harjade ja ühendusjuhtmete suhteliselt väikeste takistuste kaudu. Lühistatavas sektsioonis muutub voolu suund, sest see sektsioon, puutudes lestade kaudu kokku harjaga, läheb ühest ankru mähise harust üle teise, paralleelharusse. Selline äärmiselt kiiresti kulgev protsess kannab *kommuteerimise* nimetust. Kui kommuteerimine toimub ebarahuldavalt, siis avaldub see kõigepealt nähtavas sädelemises kommutaatoril asuvate harjade ja lestade vahel. Liigne sädelemine rikub nii kommutaatorit kui ka harjasid ning võib põhjustada isegi masina riknemise. Sellepärast on vajalik, et masina kommuteerimine toimuks praktiliselt sädevabalt.

Kommuteerimine on keerukas protsess, sest talle avaldavad mõju terve rida elektromagnetilisi, mehaanilisi, soojuslikke ja elektrokeemilisi tegureid.

Kommuteerimisprotsessi kulgemise kiirusest saame ettekujutuse, kui määrame kommuteerimise perioodi T_k, s. o. aja, mille kestel hari puutub kokku kommutaatoril kõrvuti asuvate lestadega ning lühistab ühte või mitut kõrvutiasuvat ankru mähise sektsiooni. Kui kommutaatori lestade arv on K, ankru pöörlemiskiirus n pööret minutis, harja laius kommutaatori ümbermõõdu suunas b_h ja kommutaatori samm $b_k = \frac{\pi d_k}{K}$ (d_k — kommutaatori läbimõõt), siis

$$T_k = \frac{60}{Kn} \cdot \frac{b_h}{b_k} \text{ sec.} \qquad (5\text{-}1)$$

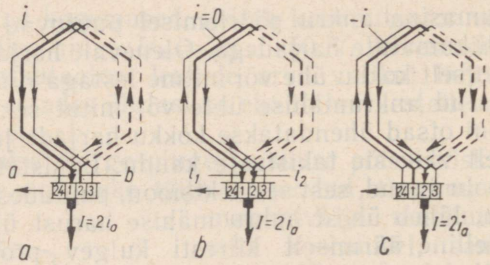
Kommuteerimise sagedus

$$f_k = \frac{1}{T_k} \text{ per/sec.} \qquad (5\text{-}2)$$

Kui näiteks $K = 200$, $n = 900$ p/min ja $\frac{b_h}{b_k} = 3$, siis $T_k = \frac{60}{200 \cdot 900} \cdot 3 = 0{,}001$ sec ja $f_k = 1000$ per/sec.

Tänapäeva alalisvoolumasinate kommuteerimise protsessi sagedus võib olla 3000 per/sec ja enamgi. Kommuteerimisprotsess on oma füüsikalise olemuse poolest kõigepealt elektriline protsess ja sellepärast tutvume esmalt tema elektrilise küljega.

Selleks kujutame tasapinnale laotatult ankru silmusmähise ja sellele vastava kommutaatori ühe osa (joon. 5-1). Joonisel on



Joon. 5-1. Kommuteerimine üksteisele järgnevatel hetkedel

näidatud lestade ja ankru mähise sektsiooni asend harja kohal üksteisele järgnevatel ajahetkedel. Lihtsuse mõttes on oletatud, et harja laius b_h on võrdne kommutaatori sammuga b_k. Lugedes lestadevahelise isolatsioonikihi paksuse tähtsusetuks, on harja laius b_h võrdne lesta laiusega.

Joonisel 5-1, *a* puutub hari kokku lestaga *1*.

Sel juhul on vool sektsiooni ja harja vahelises ühendusjuhtmes i_1 võrdne kahe haru summaarse vooluga $2i_a$. Lestade *1* ja *2* külge ühendatud sektsioon asub siis ankru mähise harjast paremal pool asuvas harus. Selles sektsioonis on vool i võrdne ankru haru vooluga i_a (joon. 5-1, *a*). Järgmisel hetkel hari puutub kokku juba kahe kõrvutiasuva kommutaatori lestaga *1* ja *2*. Lestade *1* ja *2* külge ühendatud sektsioon lühistatakse harja poolt ja vool selles sektsioonis hakkab vähenema. Kui harja keskjoon ühtib kahe kõrvutiasuva lesta kokkupuutekohaga, muutub vool i sektsioonis võrdseks nulliga, juhul kui sektsioonis ei esine elektromotoorseid jõude. Kui lest *2* hakkab jõudma harja kohale, muutub sektsioonis voolu i suund ning vool suureneb, kuni võrdsustub haru vooluga i_a. See toimub sel hetkel, kui lest *2* jõuab täielikult harja alla (joon.

5-1, *b* ja *c*). Vaadeldav sektsioon on siis üle läinud harjast vasakul asuvasse mähise harusse. Nii läheb ankru pöörlemisel iga ankrumähise sektsioon järjekorras ühest ankru harust teise ning vool i muutub selles sektsioonis suuruselt $i = i_a$ kuni $i = -i_a$. Kommuteerimise alghetkel loeme voolu i lühistatavas sektsioonis positiivseks, lõpul aga negatiivseks. Sektsiooni ja lestade vahelistes ühendusjuhtmetes tekivad voolud i_1 ja i_2 (joon. 5-1), mille suurus sõltub harja ja vastava lesta kokkupuutepinna suurusest ning harja ja lestade vahelistest üleminekutakistustest.

5-2. KOMMUTEERIMIST MÕJUTAVAD MITTEELEKTRILISED TEGURID

Kommuteerimisprotsessile avaldavad peale mitmesuguste eespool kirjeldatud elektriliste nähtuste mõju veel terve rida mehaanilisi, keemilisi ja soojuslikke tegureid. Mehaanilisi tegureid on kahte liiki. Ühed on tingitud kommutaatori ja ankru mehaanilistest puudustest, teised — harjahoidjate ja traaversite puudulikkusest.

Alalisvoolumasina kommuteerimise korrastamisel peab kõigepealt kõrvaldama kommuteerimist häirivad mehaanilised tegurid.

Ankru ja kommutaatori puudusteks on kommutaatori ekstsentriline asend võllil, kommutaatori laineline pind, lestadevahelise isolatsioonikihi üleulatumine kommutaatori pinnast, üksikute lestade väljaulatumine kommutaatori pinnalt, puudulikult tasakaalustatud ankur. Kõik nimetatud puudused põhjustavad masina töötamisel harjade hüplemist kommutaatori pinnal ning seega ankru voolu katkestusi ning sädelemist harjade ja kommutaatori pinna vahel.

Tavaliselt lõigatakse lestadevaheline isolatsioon (mikaniit) 1 . . . 1,5 mm võrra madalamaks lestade välispinnast. Üksikud lestad tungivad kommutaatori pinnast välja puuduliku kinnituse tõttu. Niisugusel juhul tuleb lesti kokkutõmbavaid polte järelpingutada. Kommutaatori lainelise pinna puhul tuleb kommutaator üle treida ja lihvida.

Harjahoidjate ja traaversite mehaaniliste puuduste hulka kuuluvad harjahoidja ebaõige kinnitus, harjahoidja liiga kauge asetus kommutaatori pinnast, liiga suur või liiga väike õhuvahe harja ja harjahoidja vahel, ebaõige või ebaühtlane surve harjale, harjahoidjate ebaühtlane asetus kommutaatori ümbermõõdul.

Kõigepealt kontrollime harjade asendit kommutaatoril. Selleks asetame ümber kommutaatori (harjade alla) kitsa pabeririba. Terava pliiatsiga märgime sellel ribal harja poltidel asuvate harjade äärte asendi. Ribal saadud joonte vahekaugused vastavad harjade kaugusele üksteisest. Kui vahed erinevad üksteisest rohkem kui

1 mm võrra, tuleb harja poltide asendit muuta, kuni erinevus on vähem kui 1 mm.

Harja mõõtmed peavad olema harjahoidja omast 0,2 ... 0,4 mm väiksemad. Vastasel korral võib hari, paisudes töötamisel tekkiva soojuse tõttu, harjahoidjasse kinni jääda. See halvendab tunduvalt kommuteerimist.

Hari peab olema kommutaatori pinnale surutud survega 150 ... 250 g/cm^2. Surve sõltub harja margist ning seda kontrollitakse vedrukaalu abil. Survet saab muuta reguleeritava survevedru abil, mis asub harjahoidjal. Hari ei tohi harjahoidjas märgatavalt vibreerida. Harja vibreerimist saab kindlaks teha isoleerainest pulgakesega, seda vastu harja hoides. Vibreerimist põhjustavad kommutaatori ovaalsus ja üleulatuv lestadevaheline isolatsioonikiht. Harjade vibreerimise esinemisel tuleb nimetatud puudused kõrvaldada.

Peale mehaaniliste põhjuste halvendavad kommutaatori töötamist keemilised protsessid kommutaatoril. Niiskuse mõjul toimub vee elektrolüütiline lagunemine kommutaatoril, kusjuures eralduva hapniku mõjul kattub kommutaatori pind oksüüdi kihiga. Viimase mõjul suureneb üleminekutakistus harjalt kommutaatorile ja harjad kuluvad suuremal määral. Lõpuks avaldab kommuteerimisele mõju harjade kvaliteet.

Pikemaajalisel töötamisel kattub kommutaatori pind oksüüdikihiga ning lestade vahele koguneb kuluvatest harjadest ja lestadest söe- ja vasetolmu. See halvendab samuti kommuteerimist.

5-3. KOMMUTEERIVAS SEKTSIOONIS ESINEVAD ELEKTROMOTOORSED JÕUD

Kommuteerimisprotsessi selgitamisel tuleb arvestada kommuteerivas sektsioonis indutseeritavate mitmesuguste elektromotoorsete jõududega.

Eespool selgus, et vool i kommuteerivas sektsioonis muutub. Seega muutub ka sektsiooniga aheldatud magnetvoog ning sektsiooni emj.

$$e_L = -L_k \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}, \qquad (5\text{-}3)$$

kus L_k — sektsiooni induktiivsus.

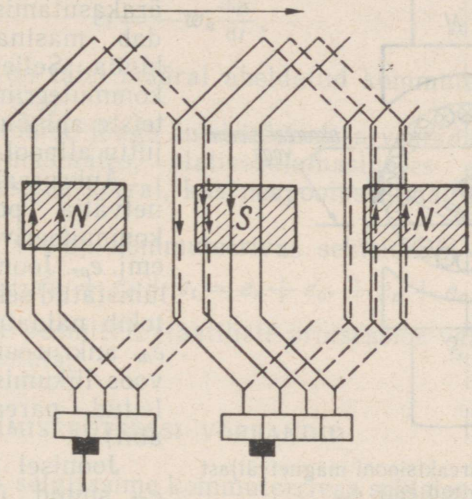
Kuna i väheneb väärtuselt $+i_a$ väärtuseni $-i_a$, siis on voolu muutus $\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ negatiivne ja seega on e_L positiivne. See tähendab, et e_L mõjub samas suunas kui vool i lühistatud sektsioonis kommuteerimise algul, püüdes takistada (aeglustada) voolu i muutumist.

Tegelikult harja laius b_h on alati suurem kui kommutaatori

samm b_k, s. t. hari katab korraga mitut kõrvuti asuvat kommutaatori lesta, lühistades seega mitut ankrul kõrvuti asuvat sektsiooni. Kuna neis sektsioonides vool samuti muutub, siis indutseeritakse lühistatud sektsioonis ka vastastikuse induktsiooni emj. e_M. Samuti põhjustab e_M tekkimist omavahel aheldatud erinevate pooluste all asuvad kommuteerivad sektsioonid (joon. 5-2):

$$e_M = -\sum M \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t}, \tag{5-4}$$

kus M — vastastikune induktiivsus,
i_k — vool mingis lühistatud kõrvuti asuvas sektsioonis.



Joon. 5-2. Vastastikuse induktsiooni emj. e_M tekkimine kommuteerivas sektsioonis

Kuna naabersektsioonide voolu muutus $\frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t}$ toimub samas suunas voolu nõrgenemisega sektsioonis, siis ka e_M on alati positiivne.

Lühistatud sektsioonis esinevad elektromotoorsed jõud e_L ja e_M moodustavad kokku *reaktiivse emj.* e_r. Reaktiivne emj. e_r sõltub, nagu näitab lähem analüüs, ankru pöörlemise ringkiirusest v_a, lühistatud sektsiooni keerdude arvust w_k, ankru voolu joontihedusest A, ankru pikkusest l ning *arvutuslikust reaktiivsest ekvivalentsest magnetilisest juhtivusest* ξ_r:

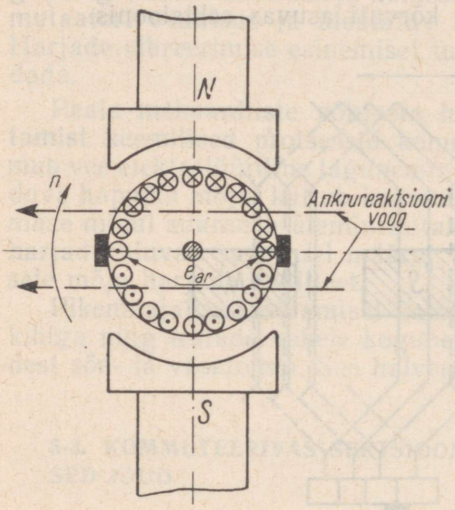
$$e_r = 2\xi_r v_a w_k A l. \tag{5-5}$$

Suurus ξ_r sõltub vaid uurde ja laupühenduste mõõtmetest. Suuruse ξ_r mõõtühikuks on H/m. Katseliselt on selgitatud, et reaktiivse ekvivalentse magnetilise juhtivuse suurus kõigub piirides $(7 \ldots 10) \cdot 10^{-6}$ H/m.

Reaktiivse emj. e_r suurus peab olema vähemalt 2 V, soodsate kommuteerimise tingimuste korral kuni 3,5 V.

Täpsemad andmed reaktiivse emj. e_r arvutamise kohta leidub projekteerimiseks määratud raamatutes.

Eeltoodud reaktiivse emj. e_r valemist (5-5) nähtub, et on soovitav ankru mähise võimalikult väike keerdude arv w_k (soodsaim $w_k = 1$). Ankru ringkiiruse v_a ja joontiheduse A vähendamine ei ole enamasti teostatav, sest näiteks joontiheduse A vähendamine halvendab masina ärakasutamist ning suurendab masina mõõtmeid ja hinda. Sellepärast püütakse kommuteerimist parandada teiste abinõudega, millest on juttu allpool.



Joon. 5-3. Ankrureaktsiooni magnetväljast tingitud emj. e_{ar}

Ankrureaktsiooni magnetvälja poolt tekitatakse kommuteerivas sektsioonis emj. e_{ar}. Joonisel 5-3 näidatud lühistatud sektsiooni külgedes tekib näidatud suunaga emj. e_{ar} ankrureaktsiooni magnetvoos liikumise tõttu (suund leitud parema käe juhise abil).

Joonisel 5-3 on näha, et e_{ar} suund ühtib lühistatud sektsiooni voolu suunaga kommuteerimise protsessi algul, s. o. kui selle sektsiooni küljed alustavad «harja alla» nihkumist. Seega on e_{ar} alati positiivne ja mõjub alati kommuteerimist aeglustavalt. Ankrureaktsiooni emj. suurus on arvutatav valemiga

$$e_{ar} = 2B_{ar} l w_k v_a, \qquad (5\text{-}6)$$

kus B_{ar} — ankrureaktsiooni magnetiline induktsioon neutraaljoone kohal või kommuteerimise tsoonis, s. o. kohas, kus asub lühistatav sektsioon.

Ankrureaktsiooni induktsioon B_{ar} on võrdeline ankru vooluga, seega oleneb e_{ar} samuti kui e_r ankru ringkiirusest v_a, sektsiooni keerdude arvust w_k ja ankru voolukattest A.

Peale mainitud kolme emj. võib lühistatud sektsioonis olla indut-

seeritud pooluste emj. e_p. See emj. indutseeritakse lühistatud sektsiooni lisapooluste magnetvoo poolt või viimaste puudumisel ka peapooluste magnetvoo poolt, kui harjad on neutraaljoonelt kõrvale nihutatud. Kuna aga eelmised kolm elektromotoorset jõudu on alati positiivsed ja toimivad aeglustavalt, siis e_p (olenevalt pooluste magnetvälja suunast), võib olla positiivne või negatiivne. Pooluste emj. e_p avaldub sarnaselt ankrureaktsiooni elektromotoorsele jõule e_{ar}:

$$e_p = 2B_p l w_k v_a, \tag{5-7}$$

kus B_p — pooluste magnetvoog.

Peapooluste magnetvoo muutumisel indutseeritakse kommuteerivas sektsioonis veel nn. transformatoorne emj.

$$e_t = -w_k \frac{d\Phi}{dt}, \tag{5-8}$$

sest pooluse voog on täiel määral aheldatud kommuteeriva sektsiooniga (vt. joon. 5-3).

Selle elektromotoorse jõuga tuleb tõsiselt arvestada vahelduvvoolu-kommutaatormasinates, alalisvoolumasinates aga ainult selliste siirdeprotsesside korral, kus peapooluste magnetvoog kiiresti muutub.

Seega resulteeriv emj. kommuteerivas sektsioonis

$$\Sigma e = e_L + e_M + e_{ar} + e_p + e_t = e_r + e_{ar} + e_p + e_t. \tag{5-9}$$

Allpool piirdume peamiselt staatiliste protsesside vaatlemisega, mispuhul e_t ei arvestata.

5-4. KOMMUTEERIMISPROTSESSI VÕRRANDID

Eespool (p. 5-1) selgitasime kommuteerivas sektsioonis esineva voolu i muutumise iseloomu. See vool on avaldatav Kirchhoffi esimese seaduse alusel hargnemispunktide a ja b kohta (joon. 5-1, a):

$$\begin{aligned} i &= i_1 - i_a \text{ (hargnemispunkt } a), \\ i &= i_a - i \text{ (hargnemispunkt } b). \end{aligned} \tag{5-10}$$

Võtame arvesse eelmises punktis toodud resulteerivat elektromotoorset jõudu (Σe) ja tähistame sektsiooni takistuse r_k, sektsiooni ja kommutaatori lestasid ühendavate juhtmete takistuse r ning harjade peale- ja mahajooksva ääre (osa) takistused R_1 ja R_2 (joon. 5-1).

Üleminekutakistused R_1 ja R_2 on pöördvõrdelised harja ja vastava lesta kokkupuutepindadega:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{S_2}{S_1}, \tag{5-11}$$

kus S_1 — harja mahajooksva ääre pindala cm^2,
S_2 — harja pealejooksva ääre pindala cm^2.

Kirchhoffi teise seaduse alusel võime lühistatud sektsiooni kohta kirjutada järgmise võrduse

$$ir_k + i_1(R_1 + r) - i_2(R_2 + r) = \Sigma e.$$

Tavaliselt on lühistatud sektsiooni takistus r_k ja ühendusjuhtmete takistus r tähtsusetu, võrreldes harjade üleminekutakistustega R_1 ja R_2. Sellepärast võib toodud võrduse kirjutada lihtsamalt:

$$i_1R_1 - i_2R_2 = \Sigma e. \tag{5-12}$$

Avaldades valemist (5-10) voolud i_1 ja i_2 ning asetades võrdusesse (5-12), leiame:

$$i = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \cdot i_a + \frac{\Sigma e}{R_2 + R_1}. \tag{5-13}$$

Seega võib voolu i lühistatud sektsioonis kujutada koosnevana kahest komponendist: voolu põhikomponent $\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \cdot i_a$ ning lisakomponent $\frac{\Sigma e}{R_2 + R_1}$.

5-5. SIRGJOONELINE KOMMUTEERIMINE

Kommuteerimisprotsessist parema ettekujutuse saamiseks oletame, et ankru pöörlemiskiirus v_a on väga väike ($v_a \approx 0$) ja lühistatud sektsiooni takistus r_k ning ühendusjuhtmete takistus r on tähtsusetu suurusega, võrreldes harjade üleminekutakistustega R_1 ja R_2 ($r_k \approx 0$ ja $r \approx 0$). Samuti olgu $b_h = b_k$. Kui kommuteerimise tsoonis puudub magnetväli ning ankru eeldatud väikese kiiruse tõttu lühistatud sektsioonis elektromotoorseid jõude ei teki ($\Sigma e = 0$), siis kommuteerimisprotsessi iseloomustav võrrand

$$i_1R_1 - i_2R_2 = 0. \tag{5-14}$$

Niisugusel tingimusel kujuneb valem (5-13) järgmiseks:

$$i = i_a \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}.$$

Võttes arvesse seost (5-11), võime kirjutada

$$i = i_a \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \tag{5-15}$$

Kui tähistada kommuteerimise algusest teatud hetkeni kulunud aega t-ga, ning teades kommuteerimise perioodi T_k (valem 5-1),

võime avaldada harja maha- ja pealejooksva osa pindala kogu harja kokkupuutepindala S kaudu järgmiselt:

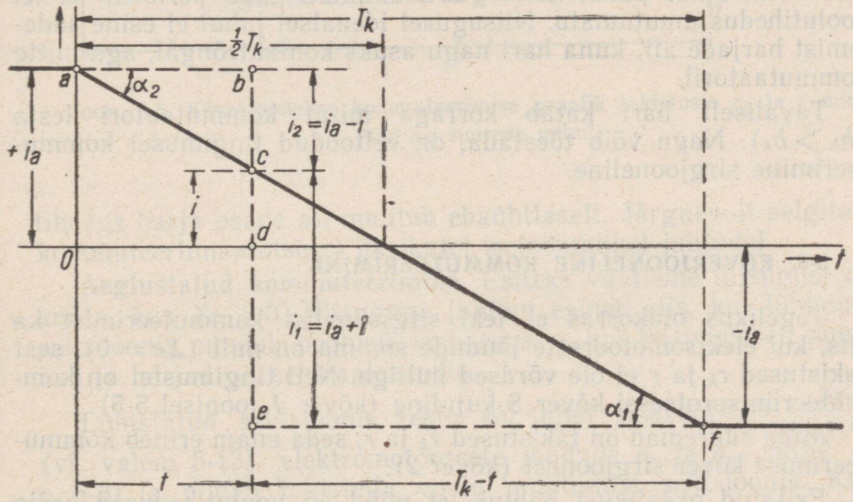
$$S_1 = S\frac{T_k - t}{T_k},$$
$$S_2 = S\frac{t}{T_k}. \qquad (5\text{-}16)$$

Asetades leitud avaldised voolu i avaldisse, leiame:

$$i = i_a\left(1 - \frac{2t}{T_k}\right). \qquad (5\text{-}17)$$

Saadud seos väljendab kommuteeriva sektsiooni voolu i sõltuvust kommuteerimise algusest arvatud ajast t.

Selle funktsiooni graafiliseks kujutuseks on sirgjoon (joon. 5-4).



Joon. 5-4. Sirgjoonelise kommuteerimise graafik

Kommuteerimise iseloomu kohta saame ettekujutuse, kui leiame voolutiheduse harja maha- ja pealejooksva osa all. Voolutihedus avaldub järgmiselt:

$$\Delta_1 = \frac{i_1}{S_1},$$
$$\Delta_2 = \frac{i_2}{S_2}.$$

Asetades siia S_1 ja S_2 väärtused valemist (5-16), leiame:

$$\Delta_1 = \frac{i_1}{T_k - t} \cdot \frac{T_k}{S}, \qquad \Delta_2 = \frac{i_2}{t} \cdot \frac{T_k}{S}. \tag{5-18}$$

Jooniselt 5-4 aga selgub, et

$$\frac{i_1}{T_k - t} = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\overline{ce}}{\overline{ef}},$$

$$\frac{i_1}{t} = \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\overline{bc}}{\overline{ab}}$$

ehk

$$\Delta_1 = \frac{T_k}{S} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1,$$

$$\Delta_2 = \frac{T_k}{S} \cdot \operatorname{tg} \alpha_2. \tag{5-19}$$

Kuna aga $\alpha_1 = \alpha_2$, siis ka $\Delta_1 = \Delta_2$ ja järelikult *sirgjoonelise kommuteerimise* puhul on kogu kommuteerimise perioodi kestel voolutihedus muutumatu. Niisugusel ideaalsel juhul ei esine sädelemist harjade all, kuna hari nagu asuks kontaktrõngal, aga mitte kommutaatoril.

Tavaliselt hari katab korraga mitut kommutaatori lesta ($b_h > b_k$). Nagu võib tõestada, on eeltoodud tingimusel kommuteerimine sirgjooneline.

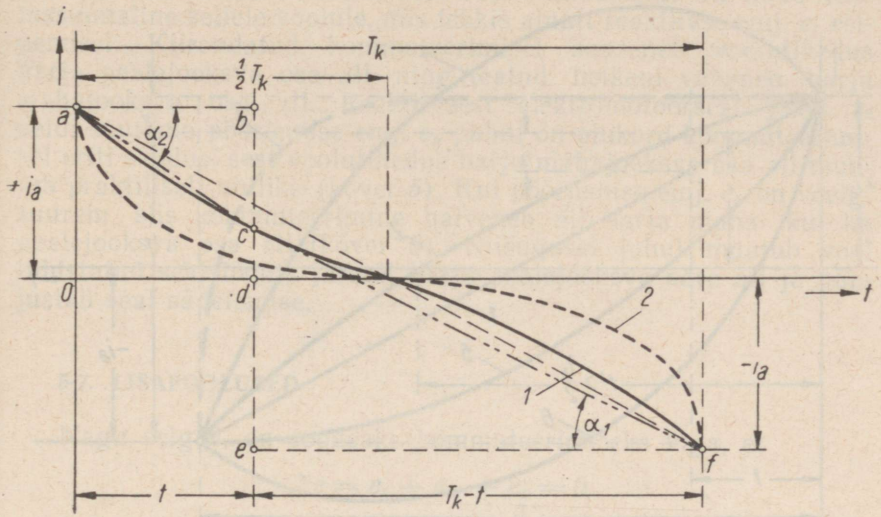
5-6. KÕVERJOONELINE KOMMUTEERIMINE

Tegelikus olukorras ei teki sirgjoonelist kommuteerimist ka siis, kui elektromotoorsete jõudude summa on null ($\Sigma e = 0$), sest takistused r_k ja r ei ole võrdsed nulliga. Neil tingimustel on kommuteerimisprotsessi kõver S-kujuline (kõver *1* joonisel 5-5).

Mida suuremad on takistused r_k ja r, seda enam erineb kommuteerimise kõver sirgjoonest (kõver *2*).

Esitatud graafikust nähtub, et nüüd on voolutihedused harja osade all muutuvad ja ei ole üksteisega võrdsed. Voolutihedus on suur kommuteerimise algul harja pealejooksva osa all ja kommuteerimise lõpul harja mahajooksva osa all. Praktiliselt aga nimetatud erinevus on tühine ning see juhtum on lähedane sirgjoonelisele kommuteerimisele.

Kui ankur pöörleb teatud kiirusega v_a, siis elektromotoorsete jõudude summa lühistatud sektsioonis ei ole võrdne nulliga. See põhjustab nimetatud sektsioonis lisavoolu i_l tekkimist (vt. valem 5-13), mis liitub sektsioonis sirgjoonelisel kommuteerimisel esineva vooluga. Lisavoolu i_l suund sõltub emj. Σe suunast ja iseloomust ning tema suurus lühistatud sektsiooni kogutakistusest $R_1 + R_2$. Kommuteerimine on nüüd kõverjooneline, sest voolu-



Joon. 5-5. Kõverjoonelise kommuteerimise graafik takistuste r_k ja r mitmesuguse suuruse puhul

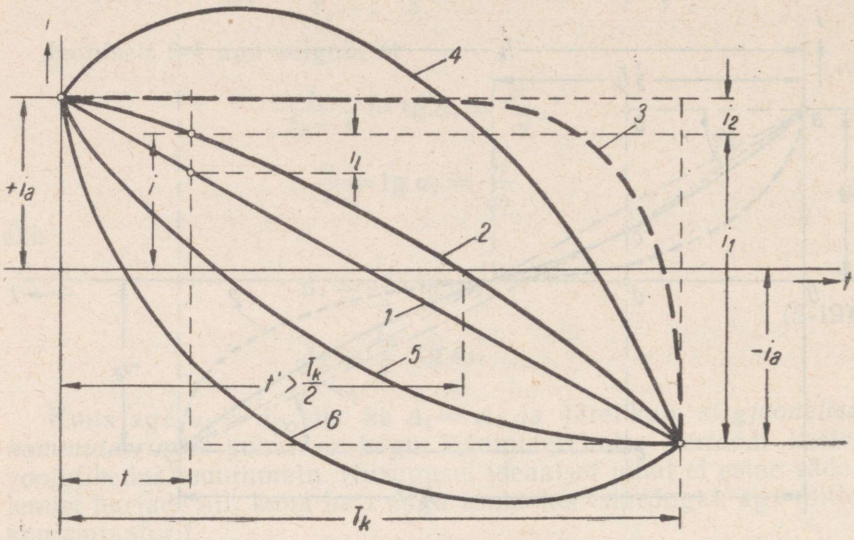
tihedus harja osade all muutub ebaühtlaselt. Järgnevalt selgitame kommuteerimisprotsessi üksikutel iseloomulikel juhtudel.

Aeglustatud kommuteerimine. Esiteks vaatleme niisugust olukorda, kus $\Sigma e > 0$. Niisugune juhtum esineb siis, kui lühistatud sektsioonis puudub pooluste emj. e_p, s. o. kui lisapoolused puuduvad ja harjad on neutraalasendis.

Lühistatud sektsioonis tekib sel juhul lisavool $i_l = \frac{\Sigma e}{R_2 + R_1}$ (vt. valem 5-13) elektromotoorsete jõudude e_r ja e_{ar} mõjul (vt. p. 5-3) ja püüab takistada voolu muutumist sektsioonis. Kuna lesta liikumisel harja all tugevneb vool i_2 ning nõrgeneb vool i_1, siis põhjustab emj. Σe lisavoolu, mis on suunalt vastupidine voolule i_2 ja samasuunaline vooluga i_1. Seega kommuteerimisvoolu muutumisele lühistatud sektsioonis vastav kõver *2* (joon. 5-6) asub kõrgemal kui sirgjoonelisele kommuteerimisele vastav joon.

Nüüd muutub vool lühistatud sektsioonis nulliks ja muudab oma suunda hiljem kui sirgjoonelisel kommuteerimisel (vt. joon. 5-5). Niisugust kommuteerimist nimetatakse aeglustatud kommuteerimiseks.

Voolutihedused harja peale- ja mahajooksva osa all ei ole enam võrdsed. Voolutihedus harja mahajooksva osa all on suurem kui pealejooksva osa all, sest lisavool i_l liitub vooluga i_1 ning lahutub voolust i_2.



Joon. 5-6. Aeglustatud kommuteerimine:
1 — sirgjooneline kommuteerimine; *2* — aeglustatud kommuteerimine; *3* — aeglustatud kommuteerimine suure emj. e_r puhul; *4* — aeglustatud kommuteerimine samasuunalise pooluste emj. e_p puhul; *5* — kiirendatud kommuteerimine, kui $e_p > e_r$; *6* — kiirendatud kommuteerimine, kui $e_p \gg e_r$

Kui lühistatud sektsiooniga aheldatud magnetvoog on suur, siis ka emj. Σe on suur ning voolu muutumine sektsioonis toimub kiiremini (kõver *3* joonisel 5-6). Sektsiooni magnetvälja küllalt suure energia puhul kaasneb harja mahajooksva osa all lühistatud sektsiooni vooluahela lahutamisel säde.

Kiirendatud kommuteerimine. Eelmises punktis kirjeldatud olukord on võimalik siis, kui harjad asuvad füüsikalise neutraaljoone kohal ning kui puuduvad lisapoolused. Kui aga harjad on nihutatud neutraaljoone suhtes ühele või teisele poole ja kui masin on varustatud lisapoolustega, võib olla $\Sigma e < 0$. Pooluste emj. e_p suund sõltub nüüd sellest, missuguse suunaga magnetvälja satub lühistatud sektsioon. Kommuteerimise tsoonis võib magnetvälja tekitada ka siis, kui harjad jäävad neutraaljoonele (lisapoolused). Pooluste emj. e_p võib seega ühtida reaktiivse emj. e_p suunaga või olla sellele vastassuunaline. Esimesel juhul muutub kommuteerimine veelgi enam aeglustatuks (kõver *4*); teisel juhul pooluste emj. e_p mõjub reaktiivelektromotoorsele jõule e_r vastu ja seega kommuteerimise tingimused paranevad. Kui $e_p = e_r$, siis tekib praktiliselt sirgjooneline kommuteerimine.

Kui aga $e_p > e_r$, muutub kommuteerimise kõver selliseks nagu näidatud joonisel 5-6 (kõver *5*). Sel juhul on tegemist kiirendatud

kommuteerimisega. Lisavool lühistatud sektsioonis on nüüd vastassuunaline sellele voolule, mis tekkis ainult reaktiivse emj. e_r esinemisel. Kiirendatud kommuteerimisel suureneb voolutihedus harja pealejooksva osa all ning teatud hetkeni väheneb harja mahajooksva osa all. Reaktiivsest elektromotoorsest jõust e_r veidi suurema pöörlemise emj. e_p puhul on olukord kommuteerimisel eriti soodus, sest voolutihedus harja mahajooksva osa all muutub praktiliselt nulliks (kõver *5*). Kui pöörlemise emj. e_p on veelgi suurem, siis kommuteerimine halveneb nii harja maha- kui ka pealejooksva osa all (kõver *6*). Niisugusel juhul muutub vool lühistatud sektsioonis järsult harja pealejooksva ääre all ja põhjustab seal sädelemise.

5-7. LISAPOOLUSED

Nagu selgus, on soodsaks kommuteerimiseks vaja, et

$$\Sigma e = e_r + e_{ar} + e_p = 0.$$

Selleks peab olema täidetud tingimus

$$e_p = -(e_r + e_{ar}).$$

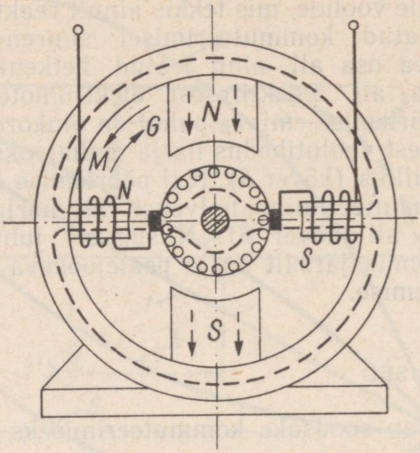
Tänapäeval on sellise olukorra saavutamise põhiliseks vahendiks lisapoolused.

Eespool (p. 5-3) selgus, et e_r ja e_{ar} on alati positiivsed ja aeglustavad kommuteerimist. Sellepärast on vaja, et lisapoolused tekitaksid magnetvälja, mis on ankrureaktsiooni väljale vastu suunatud. Lisapooluste magneetimisergutus peab olema suurem ankrureaktsiooni magneetimisergutusest, et kompenseerida ankrureaktsiooni magnetväli kommutatsiooni tsoonis ja tekitada lisaks magnetväli, mis indutseeriks lühistatud sektsioonis e_r-ga võrdse ja vastassuunalise emj. Seega tuleb lisapooluste polaarsus määrata nii, et nende magnetvoog oleks vastassuunaline ankrureaktsiooni magnetvoole.

Eelnevast järgneb lisapooluste vajalik polaarsus. Nimelt peab generaatoris lisapooluse polaarsus olema sama mis pöörlemissuunas järgneval peapoolusel, mootoris aga sama mis eelneval peapoolusel (joon. 5-7). Lisapooluseid on tavaliselt sama palju kui peapooluseid. Kuid mõnikord (väikese võimsusega masinais) on lisapooluste arv poole väiksem peapooluste arvust. Et tekitada vajalik magnetväli kommuteerimise tsoonis, tehakse lisapooluste pooluskingad suhteliselt kitsad.

Praktiliselt sirgjoonelise, s. o. soodsaima kommuteerimise saame siis, kui $e_r = e_p$. Lähtudes sellest tingimusest ja arvesse võttes e_r ning e_p avaldisi (5-7), leiame:

$$2\xi_r v_a w_k A l = 2B_k l w_k v_a,$$



Joon. 5-7. Lisapooluste polaarsus ja **magnetvoog**

millest

$$B_k = \xi_r A. \tag{5-20}$$

Saadud avaldis määrab vajaliku induktsiooni B_k kommuteerimise tsoonis. Koos koormusega muutub ka ankru voolukate A. Seepärast peaks B_k igal koormusel olema võrdeline voolukattega. Seda saavutame siis, kui teeme B_k võrdeliseks ankru vooluga I_a, sest siis on nii pooluste emj. e_p kui ka reaktiivne emj. e_r võrdelised vooluga I_a.

Sellepärast ühendatakse lisapooluste mähis järjestikku ankruga ja tekitatakse lisapooluste magnetahelas võrdlemisi väike magnetiline induktsioon, millega välditakse seal magnetilist küllastust.

Lisapooluste magneetimisergutus peab olema selline, et ta kompenseeriks ankru magneetimisergutuse $F_a = \tau A$ (vt. valem 3-3) ja looks õhupilus lisapooluse all vajaliku induktsiooni B_k. Kuna lisapooluste magnetahel on nõrgalt küllastatud, siis vajalik magneetimisergutus F_k on peamiselt lisapooluste all oleva õhupilu magneetimisergutuseks. Vastavalt valemile (2-10)

$$F_k = \frac{2}{\mu_0} B_k \delta'_1, \tag{5-21}$$

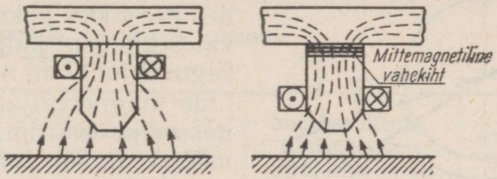
kus δ'_1 — lisapooluse õhupilu arvutuslik laius.

Seega lisapooluste magneetimisergutus ühe pooluspaari kohta

$$F_e = F_a + F_k = \tau A + \frac{2}{\mu_0} B_k \delta'_1. \tag{5-22}$$

Tavaliselt on $\delta'_1 > \delta$.

Lisapooluste puiste on suhteliselt suur: puistetegur on tavaliselt $k_s = 2 \ldots 4$. Puiste vähendamiseks asetatakse lisapooluste mähis lähemale ankru pinnale ning jaotatakse lisapooluste õhupilu kaheks osaks (mittemagnetiliste vahekihtide asetamisega lisapooluse südamiku ja masina kere vahele) (joon. 5-8).



Joon. 5-8. Lisapooluste magnetväli

Nagu eespool märgitud, on $A = 100 \ldots 600$ A/cm ja $\xi_r = (7 \ldots 10)\ 10^{-6}$ H/m, seega $B_k = 700 \ldots 6000$ Gs.

Kiirendatud kommuteerimise saamiseks võetakse B_k eeltoodust 10 ... 15% suurem.

5-8. MUUD ABINÕUD KOMMUTEERIMISE PARANDAMISEKS

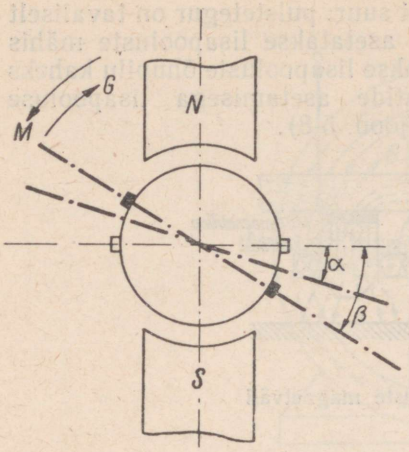
Peale lisapooluste on kommuteerimise parandamiseks veel teisi võimalusi, mida järgnevalt kirjeldame.

Harjade nihutamine neutraaljoonelt. Mõnikord ehitatakse väikese võimsusega alalisvoolumasinad ilma lisapoolusteta. Niisugusel juhul on võimalik kommuteerimist parandada harjade nihutamisega neutraaljoonelt.

Teatavasti aeglustub kommuteerimine, kui jätta harjad koormusel geomeetrilisele neutraaljoonele. Et lühistatav sektsioon asuks samas olukorras kui tühijooksul, tuleb harjad pöörata füüsikalise neutraaljoone kohale (vt. p. 4-1). Kuid sel juhul jääb kommuteerimine ikkagi aeglustatuks, sest sektsioonis mõjub siis reaktiivne emj. e_r. Kui aga pöörata harjad füüsikalisest neutraaljoonest edasi, siis satub sektsioon sellise suunaga ankrumagnetvälja, mis indutseerib liikuvas lühistatud sektsioonis reaktiivsele elektromotoorsele jõule vastusuunalise pooluste emj. e_p.

Kommuteerimine muutub kiirendatuks, kui e_p on suurem kui e_r, seega tulemus on sama mis lisapooluste puhul. Arvesse võttes resulteeriva välja moonutuse iseloomu, järeldub, et soodsa kommuteerimise saavutamiseks peame generaatoris harjad pöörama pöörlemise suunas, mootoris aga vastupidi (joon. 5-9).

Kuna aga füüsikalise neutraaljoone asend sõltub koormusest, siis tuleks muutuva koormuse puhul harjasid pidevalt nihutada, mis on praktiliselt raskesti teostatav. Seepärast on selline kom-



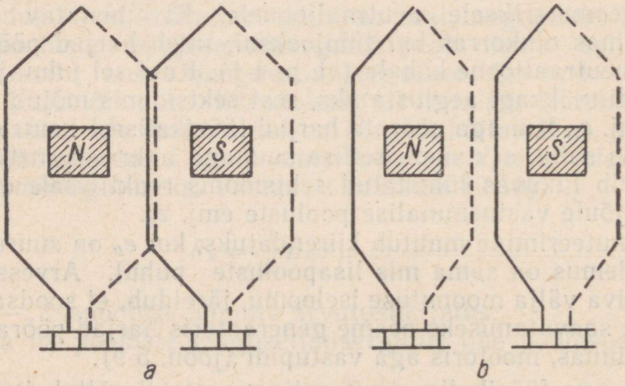
Joon. 5-9. Harjade nihutamine kommuteerimise parandamise otstarbel:
a — füüsikalise ja geomeetrilise neutraaljoone vaheline nurk; *β* — harja nihkenurk kommuteerimise parandamiseks

muteerimise parandamise viis kasutatav vaid muutumatu koormuse puhul.

Mähise konstruktsiooni sobitamine. Täissammuga ankrumähise puhul asuvad samas uurdes ülestikku kaks kommuteerivat sektsiooni külge. Seega niisugusel juhul on nende sektsioonide magnetväljade vastastikune mõju suurim. Lühendatud mähisesammu puhul ja samuti treppmähise korral asuvad kommuteerivate sektsioonide küljed eri uuretes ja seega on nende vastastikune mõju väiksem (joon. 5-10). Seetõttu lühendatud sammuga ja treppmähise puhul on lühistatud sektsioonis tekkiv reaktiivne emj. e_r väiksem, mistõttu ka kommuteerimise tingimused paranevad. Sammu lühendamine ei tohi olla suur, et kommuteeriva sektsiooni küljed ei satuks peapooluste servade lähedusse ja seega nende mõju alla.

Kommuteeriva sektsiooni takistuse suurendamine. Lisavoolu avaldisest (p. 5-6) nähtub, et üheks kommuteerimise parandamise abinõuks on lühistatud sektsiooni takistuse suurendamine. Tänapäeval teostatakse seda harjade sobiva valiku abil.

Alalisvoolumasinais kasutatakse enamasti elektrografiit- ja



Joon. 5-10. Mähise sammu lühendamine:
a — diametraalse sammuga mähis; *b* — lühendatud sammuga mähis

grafiitharjasid, madalapingelistes 5 ... 10-V masinates vahel ka vask- või pronksgrafiitharjasid. Loetletud harjade iseloomustavaks suuruseks kommuteerimise seisukohalt on harja kontaktpinnas tekkiva pingelangu ΔU_h sõltuvus voolutihedusest Δ_h harjas. Tabelis 5-1 on toodud kasutatavate harjade andmed.

Tabel 5-1

Elektrimasinate harjade tehnilised andmed
(ГОСТ 2332-43)

Harjade liik ja tähistus	Lubatav voolutihedus A cm²	Suurim lubatav kommutaatori pindkiirus m/sec	Pingelang harjapaari kohta V
Söegrafiit (УГ)	6 . . . 8	10 . . . 15	1.5 . 2,6
Grafiit (Г)	7 . . . 11	12 . . . 25	1,2 . 2,8
Elektrografiit (ЭГ)	9 . . . 12	25 . 45	1,6 . . . 3,4
Vask (М)	12 . . . 20	20 . . . 25	0,3 . . . 2,2
Vaskgrafiit (МГ)	15 . . . 20	20	0,1 1,6
Pronksgrafiit (БГ)	20	20	0,2 . . . 0 4

Nagu toodud tabelist nähtub, on pingelang sõltuvalt harja liigist erinev. Seepärast juhul, kui reaktiivse emj. e_r suuruse vähendamine ei ole läbiviidav, valitakse kommuteerimise parandamiseks suurema pingelanguga harjad (näiteks elektrografiitharjad).

Lühistatud sektsiooni ahela takistus sõltub aga ka õigest survest harjadele, kommutaatori temperatuurist, korralikust kontaktist harja ja kommutaatori pinna vahel jne.

5-9. KOMMUTEERIMISE REGULEERIMINE

Kommuteerimisprotsess on äärmiselt keeruline ja sõltub mitmesugustest mehaanilistest ja elektrilistest põhjustest. Eespool toodud analüüs ei haara kõiki neid põhjusi.

Vastavad uurimused on näidanud, et voolu ülekanne harja ja kommutaatori vahel omab ioonlahenduse iseloomu. Üleminekutakistus harjade ja kommutaatori vahel ei ole konstantne, vaid oleneb voolu tugevusest. Nendel ja teistel põhjustel muutub vool kommuteerivas sektsioonis veelgi keerukamalt. Voolu ajaline muutumine toimub järskude voolu muutuste kujul, mille tõttu ka reaktiivne emj. ei ole kommutatsiooniperioodi vältel konstantne.

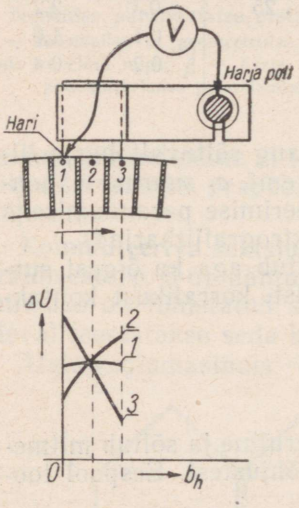
Seetõttu tuleb ülaltoodud matemaatilisi vahekordi ja graafikuid vaadelda ainult kehtivatena vastavate suuruste keskmise muutuse kohta.

Lisapoolused suudavad ainult keskmiselt kompenseerida reaktiivset elektromotoorset jõudu, kuid mitte kommuteerimisprotsessi igal hetkel. Kompenseerimata reaktiivse emj. e_r tipud raskendavad

kommuteerimist, eriti tugevate ankruvoolude ja suurte kiiruste puhul. Kõige selle tõttu ei saa lisapooluseid projekteerimise käigus täpselt dimensioneerida.

Kogemused näitavad, et iga uue alalisvoolumasina kommuteerimine vajab korrastamist. Kõigepealt tuleb üle vaadata harjad, harjahoidjad ja kommutaator. Selleks sobitatakse vastu kommutaatorit puutuvad harjade pinnad lihvimise teel kommutaatori pinnaga, kontrollitakse harjade asendit harjahoidjates ning kõikide poltide ja mutrite kinnitust. Alles siis, kui eeltoodud kontroll on teostatud, võib asuda kommuteerimise elektrilise protsessi korrastamisele. Viimane seisab peamiselt lisapooluste reguleerimises — lisapooluse õhupilu ning mähise keerdude arvu muutmises jne.

Lisapooluste reguleerimiseks on kasutusel kaks meetodit: pingelangu mõõtmine harjades ja sädelemisvaba piirkonna kindlaksmääramine. Tutvume nendega lähemalt.



Joon. 5-11. Pingelangu mõõtmine harja all

Pingelangu mõõtmine harjades. Selleks kinnitatakse voltmeetri ühe klemmiga ühendatud juhe harja külge, teise klemmiga ühendatud juhe väiksemamõõdulise harja või vaskteraviku külge. Viimast libistatakse kommutaatori pinnal harja kõrval masina pöörlemise suunas (joon. 5-11). Kui kanda mõõdetud pingelang ristkoordinaatidele sõltuvalt asendist harja kohal, saame kommuteerimise diagrammi. Pingelangu muutumise järgi võib otsustada kommuteerimise iseloomu üle. Kui kommuteerimine on praktiliselt sirgjooneline, siis on pingelang harja all peaaegu muutumatu (kõver *1* joonisel 5-11). Aeglustatud kommuteerimise puhul suureneb pingelang harja mahajooksva osa all (kõver *2*), kiirendatud kommuteerimise esinemisel aga pealejooksva osa all (kõver *3*). Esimesel juhul tuleb õhupilu lisapooluste all vähendada, teisel juhul aga suurendada.

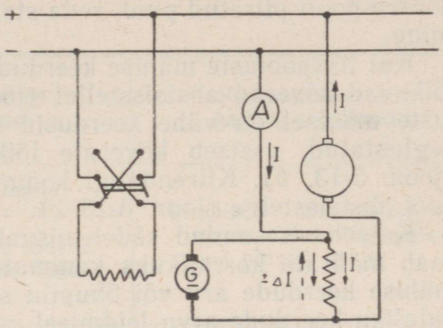
Mitmesugustel koormustel mõõdetud kommuteerimise diagrammide põhjal võib ligikaudselt hinnata lisapooluste mähise keerdude arvu või õhupilu vajaliku muutmise ulatust.

Et täpsemalt määrata vajalike muudatuste ulatust, teostatakse mõõtmine **sädelemisvaba piirkonna määramise meetodil.** Selleks toidame töötava alalisvoolumasina lisapooluste mähist lisavooluga ΔI mõnest välisest alalisvooluallikast (joon. 5-12).

Seadnud sisse teatud koormuse, muudame lisapooluste mähises lisavoolu ΔI tugevust, jälgides harjade töötamise olukorda. See-

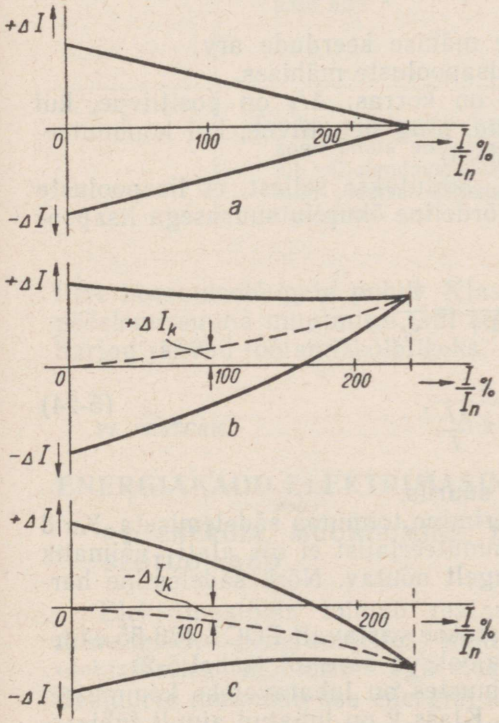
juures määrame minimaalse lisavoolu, mille puhul kaob igasugune sädelemine harja all, ning ka maksimaalse voolu, kus sädelemine parajasti tekib. Nii kordame mõõtmist mitmesugustel koormustel.

Muutes lisavoolu ΔI tugevust ja suunda, määrame kindlaks lisavoolude piirkonna, kus kommuteerimine toimub sädelemiseta. Mõõtmiste tulemusena võib joonestada kõverad (joon. 5-13) $+\Delta I = f\left(\frac{I}{I_n}\right)$ ja $-\Delta I = f\left(\frac{I}{I_n}\right)$,



Joon. 5-12. Lisapooluste lisavooluga toitmise skeem

kus I — koormusvool katsel, I_n — katsetatava alalisvoolumasina nimikoormusvool. Kui lühistatud sektsioonis $e_r = e_p$, siis saadavad ΔI kõverad on üksteisega paralleelsed. Tegelikult aga koormuse suurenemisel kommuteerimise tingimused halvenevad ning ΔI



Joon. 5-13. Sädelemisvaba kommuteerimise piirkonna graafikud

kõverad lõikuvad (joon. 5-13). Mida laiem on nimetatud kahe kõvera poolt piiratud pind, seda stabiilsem on masina kommuteerimine.

Kui lisapooluste mähise keerdude arv on õigesti määratud, siis lõikuvad kõverad abstsisteljel (joon. 5-13, *a*). Kui aga lisapooluste mähisel on vähe keerdusid ning kommuteerimine seetõttu aeglustatud, asetseb kõverate lõikepunkt ülalpool abstsisstelge (joon. 5-13, *b*). Kiirendatud kommuteerimisel on lõikepunkt allpool abstsisstelge (joon. 5-13, *c*).

Katseliselt saadud sädelemisvaba piirkonna graafikute alusel saab määrata korralikuks kommuteerimiseks vajalik lisapooluste mähise keerdude arv või õhupilu suurus lisapooluste all. Mähise vajaliku keerdude arvu leidmisel on aluseks asjaolu, et katse ajal esinev lisapooluste magneetimisergutus $w_l(I \pm \Delta I)$ on võrdne magneetimisergutusega endise normaalse vooluga ning uue keerdude arvuga w_l, s. o. Iw'_l:

$$\frac{w'_l}{w_l} = \frac{I \pm \Delta I_k}{I},$$

millest

$$w_l' = w_l\left(1 \pm \frac{\Delta I_k}{I}\right), \qquad (5\text{-}23)$$

kus w_l — vajalik lisapooluse mähise keerdude arv,

ΔI_k — keskmine lisavool lisapooluste mähises.

$\Delta I_k = 0$, kui kommuteerimine on korras; ΔI_k on positiivne, kui kommuteerimine on aeglustatud, ning negatiivne, kui kommuteerimine on kiirendatud (joon. 5-13).

Vajaliku õhupilu leidmisel lähtutakse sellest, et lisapooluste magneetimisergutus on pöördvõrdeline õhupilu suurusega lisapooluse all, s. o.

$$\frac{w_1 I}{w_1(I \pm \Delta I)} = \frac{\delta'_l}{\delta_l},$$

millest

$$\delta_l' = \delta_l \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta I}{I}}, \qquad (5\text{-}24)$$

kus δ_l' — uue vajaliku õhupilu suurus.

Tulemusena peab kommuteerimine toimuma sädelemiseta. Kuid absoluutselt sädelemiseta kommuteerimist ei ole alati võimalik saavutada ning see polegi rangelt nõutav. Nõrk sädelemine harjade all ei ole masinale ohtlik.

Sädelemist harjade all hinnatakse vastavalt ГОСТ 183-55 sädelemise astme alusel harja mahajooksva ääre all (tabel 5-2).

Normaalsetes töötamistingimustes on lubatavateks kommuteerimise klassideks 1, $1^1/_4$ ja $1^1/_2$. Klass 2 on lubatud ainult lühiaja-

Tabel 5-2

Harjade sädelemise hindamine

Sädelemise aste (kommuteerimise klass)	Sädelemise astme iseloomustus	Kommutaatori ja harjade seisukord
1	Sädelemise puudumine	Puudub kommutaatori mustumine ning põlenud pinnad harjal
$1\frac{1}{4}$	Nõrk punktitaoline sädelemine harja pinna väikese osa all	
$1\frac{1}{2}$	Nõrk sädelemine harja pinna suurema osa all	Ilmuvad mustumise jäljed kommutaatoril, mis on kergesti kõrvaldatavad kommutaatori pinna hõõrumisel bensiiniga. On märgata põlenud kohti harjadel
2	Sädelemine kogu harja ääre all	Mustumine kommutaatoril ei ole kõrvaldatav bensiiniga. Harjad tugevasti põlenud
3	Tunduv sädelemine harja kogu pinna all. Harja alt väljalendavate üksikute suurte sädemete ilmumine	Kommutaatori tunduv mustumine, harjad tugevalt põlenud ning osaliselt purunenud

liste koormusetõugete puhul. Klass 3 on lubatud käivitamisel ja pöörlemissuuna muutmisel, kui sellele järgnevalt kommutaator ja harjad jäävad töötamiskõlblikeks.

VI PEATÜKK

ENERGIAKAOD ELEKTRIMASINATES

6-1. ENERGIA MUUNDUMINE ELEKTRIMASINATES JA SELLEGA SEOTUD KAOD

Elektrimasinais toimub teatavasti ühe energialiigi muundumine teiseks: generaatorites muundatakse mehaaniline energia elektriliseks, mootorites aga elektriline energia mehaaniliseks. Seejuures muundub osa energiat soojuseks ning kuumendab masinat. Nimetatud osa energiast nimetatakse kaoenergiaks. Energia

muundumise käik on ülevaatlikult näha elektrimasina energeetilisel diagrammil.

Alalisvoolugeneraatori pinge avaldub järgmiselt (vrd. valem 1-3)

$$U = E - I_a r_a - 2\Delta U, \tag{6-1}$$

kus $2\Delta U$ — pingelang harjade kontaktpindadel.

Korrutades selle võrrandi mõlemaid pooli ankruvooluga I_a, saame seose generaatori võimsuste vahel:

$$UI_a = EI_a - I_a^2 r_a - 2\Delta UI_a. \tag{6-2}$$

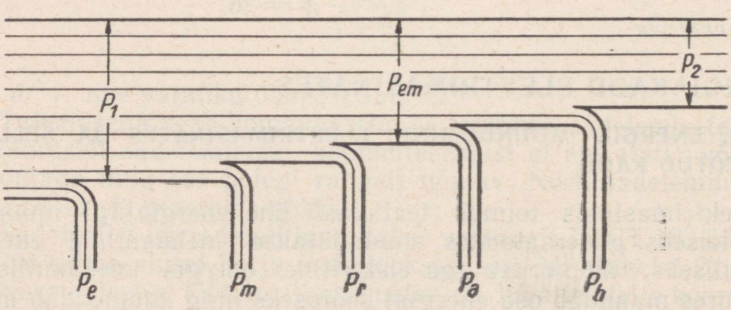
Selle seose vasakpoolne liige $UI_a = P_2$ on generaatorist saadav kasulik elektriline võimsus. Liige $EI_a = P_{em}$ on generaatori elektromagnetiline võimsus. Generaatoris on elektromagnetiline võimsus see elektriline võimsus, mis on saadud jõumasina mehaanilisest võimsusest. Liige $I_a^2 r_a = P_a$ on soojuskadu ankru ahelas; liige $2UI_a = P_h$ on võimsuskadu harjade üleminekukontaktidel. Seega mehaaniline võimsus, mis saadakse generaatorit liikuma panevast jõumasinast, muundatakse suures osas ankrus tekkivaks elektromagnetiliseks võimsuseks. Kui viimasest maha arvata kaod ankru ahelas ja harjades, saame kasuliku elektrilise võimsuse.

Täieliku energeetilise bilansi saamiseks tuleb veel arvesse võtta mehaaniline kadu generaatoris P_m ning rauaskaod pöörisvooludest ja hüstereesist ankru terassüdamikes P_r. Seega generaatori võllile jõumasina poolt rakendatav mehaaniline võimsus

$$P_1 = P_2 + P_a + P_h + P_r + P_m = P_{em} + P_r + P_m. \tag{6-3}$$

Leitud seos on energeetilise diagrammina kujutatud joonisel 6-1. P_e on haruvoolumasina ergutusahela kadu, mis toodud valemis ei ole arvesse võetud.

Alalisvoolumootori pingete vahel kehtib seos (vrd. valem 1-5)



Joon. 6-1. Alalisvoolugeneraatori energeetiline diagramm

$$U - I_a r_a - 2\Delta U = E, \qquad (6\text{-}4)$$

kus U — toitevõrgu pinge,
E — vastuelektromotoorne jõud.

Kui korrutada võrrandi pooled ankru vooluga I_a, saame võimsuste võrrandi

$$UI_a - I_a^2 r_a - 2\Delta UI_a = EI_a, \qquad (6\text{-}5)$$

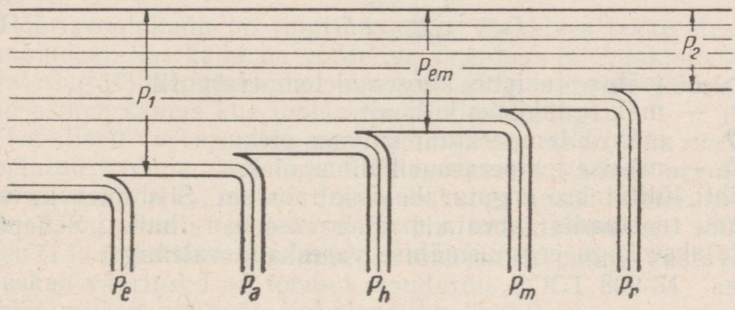
kus $UI_a = P_1$ — võrgust võetav elektriline võimsus,
$I_a^2 r_a = P_a$ — soojuskadu ankru ahelas,
$2\Delta UI_a = P_h$ — võimsuse kadu harjade kontaktpindades,
$EI_a = P_m$ — elektromagnetiline võimsus ankrus.

Elektromagnetiline võimsus P_{em} muundub mehaaniliseks võimsuseks ning selle arvel kaetakse ka mehaaniline kadu mootoris P_m ja rauaskadu terassüdamikus P_r. Järelikult kasulik mehaaniline võimsus mootori võllil

$$P_2 = P_1 - P_e - P_a - P_h - P_m - P_r = P_{em} - P_m - P_r,$$

kus P_e — ergutusahela kadu.

Mootori energeetiline diagramm on kujutatud joonisel 6-2.



Joon. 6-2. Alalisvoolumootori energeetiline diagramm

Seega tekivad alalisvoolumasinas järgmised kaod:
1) vaseskadu — tingitud voolust mähistes,
2) kadu harjade üleminekukontaktides,
3) rauaskadu — tingitud pöörisvooludest ja hüstereesist terassüdamikes,
4) mehaaniline kadu — tingitud hõõrdumisest laagrites, harjade ja kommutaatori vahel jne.,
5) lisakadu — mitmesugustest põhjustest tingitud kaod, mis ei ole haaratud eeltoodutega ning mis on suuruselt väga väikesed.

Alljärgnevalt vaatleme lähemalt ülalloetletud kadude tekkimise põhjusi ja suurust.

6-2. VASESKADU

Vaseskadu esineb alalisvoolumasina ankru, lisapooluste, kompensatsiooni- ja peapooluste mähistes.

Vaseskadu ankrus ja sellega järjestikku ühendatud mähistes määratakse lähtudes Lenz-Joule'i seadusest valemiga

$$P_v = \Sigma I_x^2 r_x, \tag{6-6}$$

kus I_x — vool vastavas mähises,
r_x — selle mähise takistus.

Takistuseks loeme mähise takistust tema töötamistemperatuuril. Vastavalt standardi ГОСТ 183-55 nõudeile tuleb takistus taandada temperatuurile 75° või mähise töötamistemperatuurile, kui viimane on teada.

Mähise takistus määratakse olemasoleval masinal otsese mõõtmise teel (tavaliselt volt- ja ampermeetriga). Projekteeritava masina mähise takistus arvutatakse mähise traadi pikkuse, ristlõike ja materjali eritakistuse alusel.

Ümberarvutamine temperatuurile 75° toimub valemiga

$$r_2 = \frac{\vartheta_2 + 235}{\vartheta_1 + 235} r_1, \tag{6-7}$$

kus r_2 — mähise takistus kõrgemal temperatuuril (75°),
r_1 — mähise takistus külmalt,
ϑ_2 — mähise temperatuur kuumas olekus,
ϑ_1 — mähise temperatuur külmas olekus.

Tihti lülitatakse ergutusahelasse reostaat. Siis tuleb ka võimsuskadu reostaadis arvata masina vaseskao hulka. Sellepärast arvutatakse kogu ergutusmähise vaseskadu valemiga:

$$P_e = U_e I_e, \tag{6-8}$$

kus U_e — pinge ergutusahela klemmidel,
I_e — ergutusvool.

6-3. KADU HARJADE ÜLEMINEKUKONTAKTIDES

Pingelang söegrafiit-, grafiit- ja elektrografiitharjades sõltub voolust vähe. Seepärast loetakse vastavalt standardile ГОСТ 183-55 pingelang ühe harja üleminekukontaktis konstantseks kõigil koormustel ja võrdseks: söe- ja grafiitharjadel 1 V, metallgrafiitharjadel 0,3 V.

Kuna kõik sama polaarsusega harjad kommutaatoril on ühendatud paralleelselt, võib kujutleda, et alalisvoolumasinas on kaks harja, positiivne ja negatiivne. Mõlemas tekib eeltoodud pingelang.

Seega on kadu harjade üleminekukontaktides:

$$P_h = 2\Delta U I_a, \tag{6-9}$$

kus ΔU — pingelang harjades.

6-4. RAUASKADU

Rauaskadu koosneb ümbermagneetimis- (hüstereesi-) ja pöörisvoolukadudest.

Ümbermagneetimiskadu (hüstereesikadu) tekib ajaliselt muutuvas magnetväljas asuvates terassüdamikkudes. Magnetvälja muutumine võib olla tingitud kas välja tekitava voolu muutumisest või terassüdamiku liikumisest magnetvälja suhtes. Ümbermagneetimiskao suurus sõltub ümbermagneetimise sagedusest ja magnetilisest induktsioonist ning kasutatava elektrotehnilise lehtterase margist. Alalisvoolumasinais tekib ümbermagneetimiskadu pooluste magnetvälja suhtes liikuva ankru südamikus ja hammastes, sest viimased asuvad ankru muutuvast voolust tekkivas muutuvas magnetväljas.

Pöörisvoolukadu on tingitud ankru plekkides tekkivatest pöörisvooludest. See kadu on võrdeline sageduse ja induktsiooni ruuduga ning sõltub plekkide paksusest ning margist. Pöörisvoolukadu esineb samas kus ümbermagneetimiskadugi.

Tavaliselt arvutatakse aga summaarne kadu, mis on võrdne nimetatud kadude summaga. Lähtesuuruseks kadude arvutamisel on erirauaskadu P_r, mis võrdub rauaskaoga antud lehtterase margi ühes kilogrammis sagedusel 50 Hz, induktsioonidel 10000 või 15000 G ja induktsiooni siinuselise muutumise puhul. Vastavad erirauaskao väärtused on toodud standardis ГОСТ 802-54 esitatud tabelis, millest väljavõte on antud tabelis 0-2.

Kui tegelik ümbermagneetimise sagedus ja induktsioon erinevad nimetatud väärtustest, saab erirauaskadu arvutada valemiga:

$$P_r = k_r p \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \left(\frac{B}{10000}\right)^2, \tag{6-10}$$

kus k_r — tegur, mis võtab arvesse lehtterase töötlemispuuduste mõju rauaskaole; tavaliselt $k_r = 1{,}2 \ldots 2{,}0$,

$f = \frac{pn}{60}$ — ümbermagneetimise sagedus Hz,

B — induktsiooni maksimaalne väärtus terassüdamikus G,

β — lehtterase margist sõltuv tegur; tavaliselt $\beta = 1{,}2 \ldots 1{,}5$.

Mehaanilise kao hulka arvatakse hõõrdekadu laagrites, kadu harjade hõõrdumisel kommutaatoril ja kadu ventilatsioonile.

Hõõrdekadu laagrites ja kommutaatoril sõltub hõõrdetegurist, survest laagrile ja harjadele ning võlli või kommutaatori pöörlemiskiirusest.

Hõõrdetegur on pöördvõrdeline erisurve ja temperatuuriga ning sõltub teatud määral pöörlemiskiirusest.

Hõõrdekadu hõõrdelaagrites on määratav valemiga:

$$P_m = 9{,}81\, k_h F v \text{ W}, \qquad (6\text{-}11)$$

kus k_h — hõõrdetegur,
F — surve laagri tapile kg,
v — võlli pöörlemiskiirus m/sec.

Hõõrdetegur on pöördvõrdeline erisurvega laagris, kui võlli pöörlemiskiirus v ja tapi temperatuur ϑ on konstantsed.

Erisurve

$$f = \frac{F}{S},$$

kus S — võlli tapi projektsioon võlli keskjoonega paralleelsele tasapinnale.

Erisurve on samuti pöördvõrdeline temperatuuriga, kui erisurve laagris f ja võlli pöörlemiskiirus v on konstantsed.

Erisurve sõltub kiirusest v; kui $v = 4 \ldots 10$ m/sec, siis on hõõrdetegur võrdeline $\sqrt{v}$, ja kui $v \geqslant 10$ m/sec, ei sõltu see kiirusest.

Kuna hõõrdetegur on pöördvõrdeline erisurvega, siis peab korrutis $k_h F$ olema konstantne, see tähendab, et hõõrdumine jääb konstantseks igal koormusel. Sellepärast on küllaldane määrata hõõrdekadu tühijooksul, sest hõõrdekadu koormusel on sama suur.

Rull- ja kuullaagrite hõõrdekadu on tavaliselt alla 10% hõõrdelaagrite vastavast kaost.

Valem (6-11) on kasutatav ka harjade hõõrdekadude määramiseks, kusjuures F on kõigi harjade summaarne surve kommutaatorile.

Ventilatsioonikadu on tingitud masina pöörlevate osade hõõrdumisest õhus. See kadu on ligikaudselt võrdeline jahutusõhu kiiruse kuubiga. Sellepärast suure pöörlemiskiirusega mootorites on see kadu eriti suur.

Tavaliselt summaarne mehaaniline kadu on alalisvoolumasinais võimsusega 10 ... 100 kW 2 ... 4%, võimsusel 100 ... 500 kW 1 ... 2,5% ja võimsusel 500 kW ning rohkem — 0,7 ... 1,5% koguvõimsusest.

6-6. LISAKADU

Kõik kaod, mida ei ole eespool nimetatud ja on seejuures raskesti määratavad, kannavad lisakao nimetust. Alalisvoolumasinais on lisakadudeks:

a) pooluskingades ankru hambulisuse tõttu pulseeriva voo tagajärjel tekkiv kadu;

b) kadu ankru südamikus põhimagnetvoo moonutuse tõttu ankrureaktsiooni mõjul;

c) suure ristlõikega massiivsetes juhtmetes pöörisvoolude tõttu tekkiv kadu;

d) voolu kommuteerimisel tekkiv kadu;

e) ühtlustusühendustes tekkiv kadu ja muud.

Loetletud kaod ГОСТ 183-55 järgi on kompenseerimata alalisvoolumasinate puhul 1% kasulikust generaatori võimsusest või mootori poolt võrgust võetavast elektrilisest võimsusest ning kompenseeritud masinate puhul vastavalt 0,5%.

6-7. KASUTEGUR

Elektrimasina kasutegur on masinast saadava kasuliku võimsuse P_2 ja masina poolt tarbitava võimsuse P_1 suhe:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \tag{6-12}$$

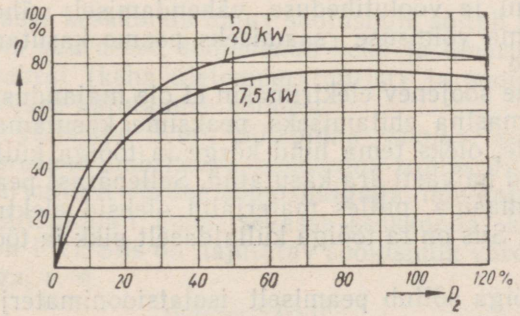
Vahe tarbitava ja kasuliku võimsuse vahel on võrdne kaovõimsusega:

$$P_1 - P_2 = \Sigma p.$$

Generaatori kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} = \frac{UI}{UI + \Sigma p}, \tag{6-13}$$

kus U — generaatori klemmipinge,
I — võrku antav vool.



Joon. 6-3. Alalisvoolumasina kasuteguri kõver

Mootori kasutegur

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} = \frac{U_v I_v - \Sigma p}{U_v I_v}, \qquad (6\text{-}14)$$

kus U_v — mootorit toitva võrgu pinge,
I_v — mootori koormusvool.

Kuna osa kaost sõltub koormusest (vaseskadu), siis sõltub kasutegur samuti koormusest ja on maksimaalne umbes $^3/_4$ koormusel. Suuremal koormusel kasutegur halveneb, sest vaseskadu suureneb võrdeliselt voolu ruuduga. Iseloomulikke kasuteguri kõveraid näeme joonisel 6-3.

Tänapäeva alalisvoolumasinate kasutegur on väiksema võimsuse puhul (alla 100 kW) nimikoormusel 75 ... 85% piirides. Suure võimsusega masinatel ulatub see kuni 95%.

VII PEATÜKK

ELEKTRIMASINATE SOOJENEMINE JA JAHUTAMINE

7-1. ELEKTRIMASINATE SOOJENEMISE JA JAHUTAMISE OLEMUS

Nagu eespool selgus, esinevad energia muundamisel elektrimasinas alati mitmesugused energiakaod. Kõik masinas tekkivad kaod muunduvad soojuseks, mistõttu masina temperatuur tõuseb ümbruskonna temperatuurist kõrgemale.

Kui induktsioon masina magnetahelas on suur, tekib suur rauaskadu. Suure voolutiheduse tõttu mähise juhtmeis suureneb vaseskadu. Seega niisugusel juhul tekib masinas suuremate kadude tõttu rohkem soojust ning masin kuumeneb enam.

Liiga kõrge töötamistemperatuur halvendab kasutatavate isoleerainete elektrilisi omadusi. Kuid ka masina mehaaniliste osade töötamistingimused võivad kõrgema temperatuuri mõjul halveneda. Nii näiteks võivad hõõrdelaagrid välja sulada, kommutaator muutuda ovaalseks või konarlikuks jne.

Induktsiooni ja voolutiheduse vähendamisel vähenevad küll kaod, kuid sama võimsuse saamiseks peame kasutama rohkem rauda ja vaske.

Selline vähe soojenev elektrimasin ei ole majanduslikult õigustatud. Kuna masina ehitamiseks peaksime kasutama suhteliselt palju materjale, oleks tema hind kõrge ja tööiga küll väga pikk, kuid materjalid halvasti ära kasutatud. Sellepärast peame ehitama sellise elektrimasina, milles materjalid oleksid elektriliselt hästi ära kasutatud. Siis on ta tööiga küllaldaselt pikk ja töötamine kindel.

Masina tööiga sõltub peamiselt isolatsioonimaterjalide kvaliteedist ja töötamistemperatuurist. Nagu näitavad kogemused, hal-

venevad isoleeraine omadused kiiresti temperatuuri tõusmisel. Näiteks on puuvillisolatsiooni iga temperatuuril 90° 10 . . . 15 aastat. Kuid kui tõsta temperatuuri 125°-ni, on selle isolatsiooni iga kõigest 2,5 aastat, 150° juures aga 3 päeva. Lähtudes elektrimasinate ekspluatatsiooni kogemustest, on soovitavaks masina tööeaks 10 . . . 15 aastat.

Mitteorgaaniliste isoleerainete, nagu vilgukivi, asbesti, klaasi jne. töötamistemperatuur võib olla kõrgem. Nimetatud isoleerainete immutamisel kuumuskindlate lakkidega võib töötamistemperatuur tõusta kuni 130°. Kasutades aga isoleerainetena räniorgaanilisi ühendeid, nn. silikoone, võib masina töötamistemperatuur tõusta isegi kuni 175°.

Sellisel temperatuuril võib tunduvalt vähendada masina mõõtmeid ja kaalu.

Ülalöeldust on selge, kui suure tähtsusega on masina jahutamine. Mida paremini jahutame masinat, seda paremini saame ära kasutada masina materjale ja seda pikem on masina iga.

7-2. ÜHTLASE TAHKE KEHA SOOJENEMINE

Elektrimasina soojenemisest saame ettekujutuse, kui uurime esmalt lihtsaimat soojenemisprotsessi. Oletame, et on olemas ühtlane tahke keha, mille kõik punktid on sama temperatuuriga ning mille välispind hajutab soojust ümbritsevasse keskkonda täiesti ühtlaselt. Eraldugu ses kehas ajaühikus Q kalorit soojust. Ajavahemikus dt eraldub siis kehas $Q dt$ suurune soojushulk. Kehas eralduva soojuse üks osa kulub keha enda soojendamiseks, mille tulemusel keha temperatuur tõuseb ümbritseva keskkonna suhtes. Teine osa eralduvast soojusest aga hajub ümbritsevasse keskkonda, tavaliselt õhku.

Olgu keha mass G kg ja tema erisoojus c kcal/kg°. Kui selle keha temperatuur tõusis aja dt jooksul $c\,d\vartheta$ võrra, siis aja dt jooksul keha soojenemiseks vajalik soojushulk

$$dQ_c = Gc d\vartheta.$$

Ümbritsevasse keskkonda hajuv soojushulk sõltub soojust hajutava välispinna suurusest, soojenenud keha ja ümbruskonna temperatuuride vahest (keha ületemperatuurist) ja soojust hajutava välispinna soojuse hajutamise võimest.

Olgu keha välispind S m², välispinna *soojuse siirdetegur* λ, keha *ületemperatuur* ümbritseva keskkonna suhtes ϑ. Soojuse siirdetegur λ on arvuliselt võrdne soojushulgaga, mis hajub ajaühikus antud keha välispinnalt ümbritsevasse keskkonda, kui keha ületemperatuur on 1° C. Siis on hajutatav soojushulk võrdeline eeltoodud suurustega, s. o.

$$dQ_\lambda = S\lambda\vartheta dt.$$

Eeltoodust võime kirjutada soojenemise võrrandi:

$$Q\mathrm{d}t = Gc\mathrm{d}\vartheta + S\lambda\vartheta\mathrm{d}t. \tag{7-1}$$

Soojenemise algul, kui ületemperatuur $\vartheta = 0$, kulub kogu eralduv soojus keha temperatuuri tõstmiseks. Mida suuremaks muutub keha ületemperatuur ϑ, seda enam soojust hajub ümbritsevasse keskkonda. Mõne aja pärast, kui oletame, et eralduv soojushulk $Q = \text{const}$, soojeneb keha niisuguse *maksimaalse ületemperatuurini* ϑ_{max}, mil kogu kehas eralduv soojushulk siirdub väliskeskkonda. Nii saabub püsiv soojuslik olukord. Siis võrrandi (7-1) põhjal:

$$Q\mathrm{d}t = S\lambda\vartheta_{max} \cdot \mathrm{d}t,$$

millest

$$\vartheta_{max} = \frac{Q}{S\lambda}. \tag{7-2}$$

Nii selgub, et keha lõplik ületemperatuur ϑ_{max} ei sõltu keha massist ega tema erisoojusest, vaid ainult eralduvast soojushulgast Q, välispinnast S ja soojuse siirdetegurist λ.

Soojenemise võrrandile võime anda teistsuguse kuju, kui avaldada valemist (7-2) $Q = S\lambda\vartheta_{max}$ ja asetada võrrandisse (7-1):

$$S\lambda\vartheta_{max}\,\mathrm{d}t = Gc\mathrm{d}\vartheta + S\lambda\vartheta\,\mathrm{d}t.$$

Selle võrduse võime kirjutada järgmiselt:

$$\frac{\mathrm{d}\vartheta}{\vartheta_{max} - \vartheta} = \frac{\mathrm{d}t}{\frac{Gc}{S\lambda}} = \frac{\mathrm{d}t}{T}, \tag{7-3}$$

kus $T = \frac{Gc}{S\lambda}$.

Anname suurusele T teise kuju, avaldades valemist (7-2) $S\lambda = \frac{Q}{\vartheta_{max}}$:

$$T = \frac{Gc\,\vartheta_{max}}{Q}. \tag{7-4}$$

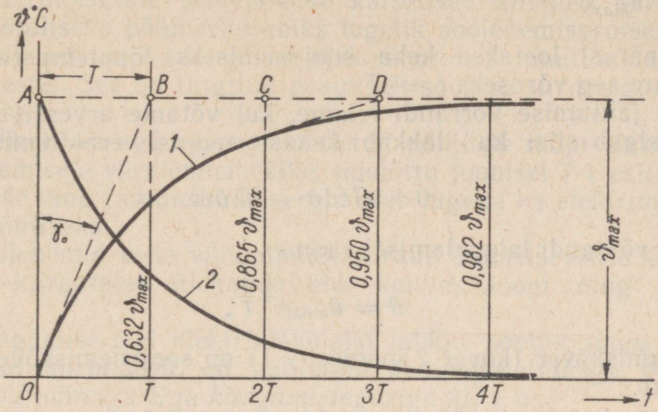
Valemist (7-3) selgub, et T on konstantne suurus, sest G ja S on konstantsed ning ka c ja λ on praktiliselt konstantsed. Valemist (7-4) aga näeme, et T on aeg, mille jooksul keha massiga G ja erisoojusega C soojeneb ületemperatuurini ϑ_{max}, kui selles kehas eraldub ajaühikus Q ühikut soojust, ilma et soojus siirduks väliskeskkonda. Sellepärast nimetatakse suurust T *soojenemise ajakonstandiks.*

Leiame järgnevalt keha ületemperatuuri muutumist iseloomustava avaldise, oletades, et alghetkel ($t = 0$) on keha temperatuur võrdne ümbruskonna temperatuuriga, s. t. $\vartheta = 0$. Võrrandi (7-3) integreerimisel saame pärast teisendamist:

$$\vartheta = \vartheta_{max}(1 - e^{-\frac{t}{T}}), \qquad (7\text{-}5)$$

kus $e = 2{,}718$ — naturaallogaritmide alus.

Leitud ϑ avaldis on eksponentsiaalne funktsioon ajast t ja on kujutatud joonisel 7-1 kõveraga *1*.



Joon. 7-1. Soojenemis- ja jahtumiskõverad:
1 — soojenemiskõver; *2* — jahtumiskõver

Esitatud soojenemiskõvera abil saab graafiliselt määrata soojenemise ajakonstanti T. See selgub, kui võtta võrrandist (7-5) esimene tuletis hetkel $t = 0$:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_{t=0} = \frac{\vartheta_{max}}{T} e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\vartheta_{max}}{T}, \qquad (7\text{-}6)$$

millest

$$T = \frac{\vartheta_{max}}{\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_{t=0}} = \frac{\vartheta_{max}}{\operatorname{ctg}\gamma_0} = \vartheta_{max} \operatorname{tg}\gamma_0, \qquad (7\text{-}7)$$

kus γ_0 — kõvera alguspunkti tõmmatud puutuja ja ordinaattelje vaheline nurk.

Seega T leidmiseks on vaja tõmmata kõverale selle alguspunktis puutuja. Puutuja lõikepunkt joonega $\vartheta_{max} = \text{const}$ määrab sirglõigu AB, mis ongi otsitud T väärtus (joon. 7-1). Ajakonstandi T võime leida mistahes soojenemiskõvera punktis, kui tõmbame selles punktis kõverale puutuja. Näiteks määrab ajakonstandi T väärtuse ka lõik CD, mille otspunktideks on puutuja ja kõvera punkti ordinaadi lõikepunktid joonega $\vartheta_{max} = \text{const}$.

Ületemperatuuri avaldisest (7-5) selgub, et keha saavutab lõpliku temperatuuri ϑ_{max} lõpmatu pika aja jooksul. Tegelikult aga saavutab keha temperatuuri ϑ_{max} suhteliselt lühikese ajaga. Selgi-

tuseks leiame valemi (7-5) järgi keha ületemperatuuri hetkedel $t = T$, $2T$, $3T$ ja $4T$.

t	T	$2T$	$3T$	$4T$
$\frac{\vartheta}{\vartheta_{max}}$	0,632	0,865	0,95	0,982

Sellepärast loetakse keha soojenemiseks lõpptemperatuurini ϑ_{max} kuluv aeg võrdseks $t \approx 4T$.

Keha jahtumise võrrandi leiame, kui võtame arvesse, et jahtumine algab siis, kui lakkab kehast soojuse eraldumine, s. t. $Q = 0$:

$$0 = Gcd\vartheta + S\lambda\vartheta dt. \tag{7-8}$$

Selle võrrandi lahendamisel saame:

$$\vartheta = \vartheta_{max} e^{-\frac{t}{T}}. \tag{7-9}$$

Jahtumiskõver (kõver *2* joonisel 7-1) on soojenemiskõvera peegelpildiks.

Tegelikult toimub pöörleva elektrimasina jahtumine erinevates tingimustes, võrreldes nendega, mis olid aluseks eeltoodud jahtumisvõrrandi (7-9) tuletamisel. Kuna pöörlev elektrimasin omab enamasti ventilaatorit, mis paneb jahutusõhu liikuma jahutava masina soojenenud pindade suhtes, siis masina seismajätmisel jääb ka ventilatsioon ära ja sellega muutuvad ka jahtumistingimused. Nimelt sõltub soojuse siirdetegur λ jahutusõhu liikumise kiirusest ja seega on jahtumise ajakonstant T (vt. valem 7-3) erinev soojenemise ajakonstandist. Sellepärast ei ole elektrimasina tegelik jahtumiskõver soojenemiskõvera peegelpildiks.

7-3. ELEKTRIMASINATE SOOJUSE HAJUMISE TINGIMUSED

Tahke keha soojenemise protsess on rakendatav ka tegeliku elektrimasina soojenemise uurimisel. Kuid tuleb arvesse võtta, et tegelik elektrimasin tervikuna ei kujuta endast ühtlast keha, vaid ta koosneb erinevatest materjalidest valmistatud osadest, millel on erinevad omadused. Seetõttu on eespool toodud tahke ühtlase keha soojenemise teooria kasutatav ainult elektrimasinate üksikute osade kohta. Alalisvoolumasinate puhul tuleb uurida laagrite, kommutaatori, ankru mähise, peapooluste mähiste, lisapooluste mähiste jne. soojenemist eraldi. Kuid ka loetletud üksikosad ei kujuta endast täiesti ühtlasi kehi. Näiteks ankru mähis koosneb vaskjuhtmetest, ning juhtmete, uurete ja laupühenduste mitmesugustest isoleerainete kihtidest. Seejuures on vask hea ja isolatsioon halva soojusjuhtivusega. Soojus tekib terassüdamikus ja mähises, kust ta levib läbi isolatsioonikihtide väliskeskkonna suu-

nas. Eelnevast selgub, et täpne elektrimasina soojenemisprotsessi uurimine on keerukas ülesanne. Lihtsuse mõttes käsitletakse enamasti masina nimetatud üksikosi ühtlaste kehadena, oletades, et nende temperatuur on soojenemisel ühtlane. Selline käsitlusviis annab küllalt häid tulemusi.

Elektrimasinate soojenemise katselised andmed näitavad, et üheks oluliseks põhjuseks, miks tegelik soojenemisprotsess erineb teoreetilisest, on soojenemise ajakonstandi T muutumine soojenemise kestel. See on tingitud peamiselt soojuse siirdeteguri λ muutumisest.

Üldiselt on aga eespool loetletud põhjuste mõju elektrimasina soojenemisele võrdlemisi väike, mistõttu joonisel 7-1 esitatud soojenemise ning jahtumise kõveraid võib lugeda ka elektrimasinatele iseloomulikeks.

Soojenenud keha välispinnalt siirdub ümbritsevasse keskkonda soojus kiirgamise, ülekande ehk konvektsiooni ning juhtivuse teel.

Kiirgamise teel elektrimasinaist lahkuv soojus, nagu näitavad lähemad uurimused, on võrdeline ületemperatuuriga ϑ, soojust kiirgava pinnaga S ja *kiirgamisteguriga* λ_k, s. o.:

$$Q_k = \lambda_k \vartheta S. \tag{7-10}$$

Kiirgamistegur on arvuliselt võrdne soojushulgaga vattides, mis kiirgub pinnalt 1 m^2, kui keha ületemperatuur on 1°.

Elektrimasinatel on kiirgamistegur kogemuste kohaselt $\lambda_k = (6 \ldots 8)$ W/grad · m^2.

Osa soojust annab kuumenenud elektrimasin ära teda ümbritsevale keskkonnale (õhule) vahetu ülekande teel. Kuumad masinaosad soojendavad ümbritsevaid õhukihte. Soojenedes need tõusevad üles ja nende asemele voolavad uued külmemad õhukihid.

Tegelikult elektrimasinais esinevate temperatuuride piirides on konvektsiooni teel ümbritsevasse keskkonda (õhku) siirduva soojuse avaldis analoogiline kiirgamissoojuse valemile:

$$Q_{\ddot{u}} = \lambda_{\ddot{u}} \vartheta S. \tag{7-11}$$

Selles valemis esinev *konvektsioonitegur* $\lambda_{\ddot{u}}$ sõltub ümbritseva keskkonna liikumise kiirusest soojenenud keha suhtes.

Kogemused näitavad, et kui soojenenud elektrimasin jahtub ilma ventilatsiooniseadmeid rakendamata, siis on konvektsioonitegur $\lambda_{\ddot{u}} = (8 \ldots 10)$ W/grad · m^2.

Kui on olemas ventilatsiooniseade, mille tõttu õhk liigub teatud kiirusega soojenenud pindade suhtes, on konvektsioonitegur näiteks arvutatav järgmise empiirilise valemiga:

$$\lambda_{\ddot{u}}' = \lambda_{\ddot{u}}(1 + C\sqrt{v}), \tag{7-12}$$

kus v — õhu kiirus jahutatava pinna suhtes m/sec,
$\lambda_{\ddot{u}}$ — konvektsioonitegur loomulikul jahtumisel,

C — konstant, mille suurus oleneb liikuva õhu poolt jahutatava pinna suhtelisest suurusest. Kui näiteks jahutatakse kogu masina pinda, on $C = 1{,}3$, osaliselt jahutatava pinna puhul on C vastavalt väiksem.

7-4. ELEKTRIMASINATES KASUTATAVAD ISOLEERAINED JA NENDELE LUBATAVAD ÜLETEMPERATUURID

Elektrimasinais kasutatavad isoleerained liigitatakse vastavalt kehtivale standardile ГОСТ 183-55 kuude klassi, mille kohta on andmed toodud sissejuhatavas osas.

Isoleerainete klassidele on lubatud standardi kohaselt maksimaalsed temperatuurid ja ületemperatuurid. Maksimaalseks isoleeraine temperatuuriks loetakse selline temperatuur ϑ_{max}, mille juures antud materjali kõige enam kuumenenud kohad on kasutuskõlblikud vastuvõetava tööea jooksul.

Isoleeraine maksimaalne temperatuur on võrdne maksimaalselt lubatava jahutuskeskkonna temperatuuri $\vartheta_{0\,max}$ ja kõige rohkem kuumenenud isoleermaterjali osa ületemperatuuri $\vartheta_{ü}$ summaga:

$$\vartheta_{max} = \vartheta_{0\,max} + \vartheta_{ü}. \qquad (7\text{-}13)$$

Tuginedes kauaaegse elektrimasinate ekspluatatsiooni kogemustele on standardis kindlaks määratud järgmised lubatavad temperatuurid klass A isoleerainete kasutamisel 105° ja klass B isoleerainete puhul 130°.

Standardi ГОСТ 183-55 alusel loetakse maksimaalseks jahutuskeskkonna temperatuuriks +35°. Seega on maksimaalselt kuumenenud keha punktide lubatav ületemperatuur $\vartheta_{ü}$ klass A isoleerainete puhul 70° ja klass B puhul 95°.

Eeltoodud temperatuuride kindlaksmääramisel on lähtutud tegelikkudest elektrimasinate ekspluatatsioonitingimustest. Nimelt on jahutuskeskkonna temperatuur tihti alla +35° ja masina koormus on ka enamasti väiksem sellest, millele vastab maksimaalselt lubatav ületemperatuur $\vartheta_{ü}$. Kui klass A ja B isoleerained töötaksid katkestamatult ülaltoodud temperatuuril, siis oleks nende tööiga ligikaudu 10 aastat. Tegelikkudes töötingimustes aga osutub isoleerainete tööeaks 10 ... 15 aastat, mida tuleb lugeda praktiliselt vastuvõetavaks.

Klassi A ja B kuuluvate isoleerainete lubatavad ületemperatuurid ГОСТ 183-55 kohaselt on antud tabelis 7-2.

Elektrimasina temperatuuri mõõtmine võib toimuda termomeetri abil, mähise takistuse mõõtmise teel, masinasse sisseasetatud või -ehitatud temperatuuri mõõtmise seadiste abil.

Termomeetriga saab mõõta nende masina osade temperatuuri, mis on kättesaadavad. Sel teel määratakse kindlaks masina pinna temperatuur termomeetri asukohas.

Lubatavad ületemperatuurid jahutusõhu maksimaalse temperatuuri +35° C juures

Masina osa	Isoleermaterjali klass				
	A		*B*		
	Temperatuuri mõõtmise viis				
	Termomeetriga	Takistuse mõõtmise teel	Termomeetriga	Takistuse mõõtmise teel	Sisseehitatud või -asetatud temperatuuri detektoritega samas uurdes asuvate poolide vahel
1. Vahelduvvoolumähised sünkroon- ja asünkroonmasinatel, mille võimsus on 5000 kVA ja rohkem või südamiku pikkus 1 m ja rohkem	—	—	—	80	85
2. a) Alla 5000 kVA võimsusega või alla 1 m pikkuse südamikuga vahelduvvoolumasinate mähised b) Alalisvooluergutusega alalis- ja vahelduvvoolumasinate mitmekihilised ergutusmähised, välja arvatud p. 3 ja 4 nimetatud mähised	60	65	75	85	—
3. a) Ühekihilised ergutusmähised	70	70	95	95	—
b) Asünkroonmasinate rootorite varrasmähised, kui varraste arv uurdes ei ole üle kahe	—	70	—	95	—
4. Mitmekihilised väikese takistusega ergutusmähised ja kompensatsioonimähised	65	65	85	85	—
5. Katkestamatud suletud isoleeritud mähised	65	—	85		
6. Katkestamatud suletud isoleerimata mähised	Nende osade temperatuur ei tohi ületada suurust, mis osutuks ohtlikuks isoleerainetele ja teistele läheduses olevatele materjalidele				
7. Terassüdamikud ja muud osad, mis ei puutu kokku mähistega					

Masina osa	Isoleermaterjali klass				
	A		B		
	Temperatuuri mõõtmise viis				
	Termomeetriga	Takistuse mõõtmise teel	Termomeetriga	Takistuse mõõtmise teel	Sisseehitatud või -asetatud temperatuuri detektoritega samas uurdes asuvate poolide vahel
8. Terassüdamikud ja muud osad, mis puutuvad kokku mähistega	65°, kui mähiste isolatsioon kuulub klassi A; 85°, kui mähiste isolatsioon kuulub klassi B ja seejuures aktiivsüdamiku teraslehtede isoleerimiseks kasutatakse vastavat lakki				
9. Kaitstud ja kaitsmata kontaktrõngad	70	—	90	—	—
10. Kommutaatorid	65	—	85	—	—

Märkused. 1. Laagritele on kindlaks määratud järgmised lubatavad temperatuurid: hõõrdelaagritele 80°, veerelaagritele 95°.

2. Tabelis toodud ületemperatuurid on maksvad masinatele, mis on üles seatud mitte üle 1000 m kõrgusele merepinnast ning mis on määratud töötama kestvalt või vaheajaliselt.

3. Lühiajaliselt töötavates masinates, mille kohta ei ole eriviiteid standardis (või tehnilistes tingimustes), võivad ületemperatuurid ületada tabelis 7-2 antud suurusi 15° C võrra, kui temperatuur määratakse mähise takistuse mõõtmise teel, ja 10° C võrra, kui temperatuuri mõõdetakse termomeetriga.

4. Kui ümbritseva jahutuskeskkonna temperatuur on +35 ... 45°, tuleb tabelis 7-2 antud ületemperatuurid kõikidele isoleerainete klassidele vähendada vahe võrra jahutuskeskkonna tegeliku temperatuuri ja +35° C vahel. Masinatele lubatavad koormused selliselt muudetud lubatavate ületemperatuuride puhul peavad olema antud tootva tehase poolt.

Temperatuuri saab määrata mähise takistuse mõõtmise teel külmas ja kuumenenud olekus. Temperatuuri leiame takistuse suurenemise alusel valemist:

$$\vartheta_{ü} = \frac{r_2 - r_1}{r_1} (235 + \vartheta_1) + \vartheta_1 - \vartheta_a, \qquad (7\text{-}14)$$

kus $\vartheta_{ü}$ — mähise keskmine ületemperatuur ümbritseva õhu suhtes,

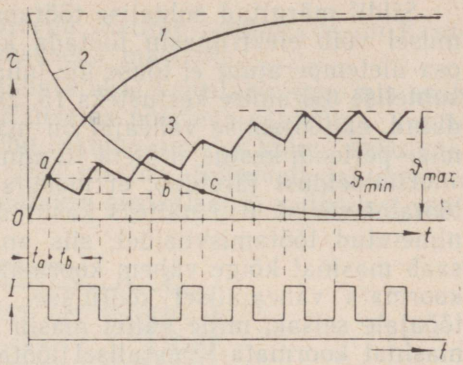
ϑ_a — jahutusõhu temperatuur,

r_2 — mähise takistus kuumas olekus,

r_1 — mähise takistus külmalt,

ϑ_1 — mähise temperatuur külmalt.

Takistuse mõõtmise teel leitakse mähise keskmine temperatuur. Üksikute mähise osade temperatuur võib seejuures olla kõrgem või madalam.



Joon. 7-2. Elektrimasina soojenemine vaheajalise töötamisviisi korral

Mõnikord asetatakse masina ehitamise ajal kohtadesse, mis on kättesaamatud pärast masina valmistamist ja kus on oodata kõrgemat temperatuuri (uurdesse, südamiku plekkide vahele), termopaarid või takistustermomeetrid. Sel puhul on võimalik mõõta soovitud kohtades temperatuuri masina töötamise ajal.

7-5. ELEKTRIMASINATE SOOJENEMINE SÕLTUVALT TÖÖTAMISVIISIST

Sõltuvalt ekspluatatsiooni tingimustest võib elektrimasinate töötamisviis (tööreżiim) olla kestev, lühiajaline ja vaheajaline. Kui masina sildil ei ole midagi nimetatud tööreżiimi kohta, siis on masin määratud töötama kestvalt.

Kestvaks nimetatakse niisugust töötamisviisi, mispuhul masina töötamisaeg on nii pikk, et kõik masinaosad jõuavad soojeneda püsiva lõpptemperatuurini. Jahutuskeskkonna temperatuur peab sel juhul olema muutumatu.

Lühiajaliseks nimetatakse töötamisviisi, mispuhul masina töötamisaeg on nii lühike, et masin ei suuda selle ajaga soojeneda püsiva temperatuurini. Töötamise ajavahemikule järgnev töövaheaeg või töötamine koormuseta on aga seejuures sellise kestusega, mille jooksul masin praktiliselt jahtub väliskeskkonna temperatuurini.

Lühiajalise töötamise aeg on märgitud masina sildile ning on standardi ГОСТ 183-55 kohaselt võrdne 15, 30, 60 ja 90 minutiga.

Vaheajaline on niisugune töötamisviis, mispuhul töötamine perioodiliselt vaheldub seisakutega, kuid seisuaja vältel ei jõua mootor jahtuda ümbritseva keskkonna temperatuurini. Seda töötamisviisi iseloomustatakse *suhtelise töötamiskestusega*, mis kujutab endast töötamiskestuse ja kogu töötamisperioodi suhet protsentides.

Sildil märgitud suhtelise töötamiskestusega vaheajalisel koormusel võib elektrimasin töötada kuitahes kaua, kui ühegi tema osa ületemperatuur ei tõuse üle lubatava. Standardis on määratud suhtelise töötamise kestusteks 15, 25, 40 ja 60%. Seejuures on eeldatud, et töötamise vaheajal on masin liikumatu ning ühe töötamise perioodi kestus ei ületa 10 minutit.

Ülalöeldust järeldub, et masina maksimaalne võimsus sõltub töötamisviisist. Kui näiteks kasutada ühte ja sama masinat ülalnimetatud töötamisviisidel, siis on ilmne, et kestval töötamisel saab masinat kõige vähem koormata. Sama masinat võib rohkem koormata vaheajalisel koormusel, sest sel juhul järgneb igale tööajale seisak, mille vältel masin jahtub. Veel enam saab sama masinat koormata lühiajalisel töötamisel, sest lühikese töötamisaja kestel ei jõua masin soojeneda püsiva lõpptemperatuurini, mille tõttu võime teda vastavalt üle koormata nii, et töötamisaja lõpuks masina temperatuur tõuseb lubatava piirtemperatuurini.

Joonisel 7-2 on näidatud elektrimasina soojenemiskõver kestval koormusel *1*, jahtumiskõver *2* ja vaheajalise töötamisviisi korral kujunev soojenemiskõver *3*, mis kujutab endast siksakjoont. Samal joonisel on antud ka vaheajalisele töötamisviisile vastav koormuskõver, s. o. elektrimasina koormusvoolu sõltuvus töötamisajast.

Nii vaheajalisel kui ka lühiajalisel töötamisel toimub masina soojenemine ja jahtumine vastavate soojenemis- ning jahtumiskõverate järgi. Näiteks vaheajalise töötamise puhul soojeneb masin algul soojenemiskõvera lõigu *oa* järgi ning jahtub seejärel jahtumiskõvera lõigu *bc* järgi. Teatud aja möödudes vaheajalise töötamisviisi puhul jääb masina temperatuur kõikuma teatud piirides (ϑ_{max} ja ϑ_{min} vahele), mis vastab keskmisele ületemperatuurile $\vartheta_{ü}$.

7-6. ELEKTRIMASINATE JAHUTAMINE JA VENTILEERIMINE

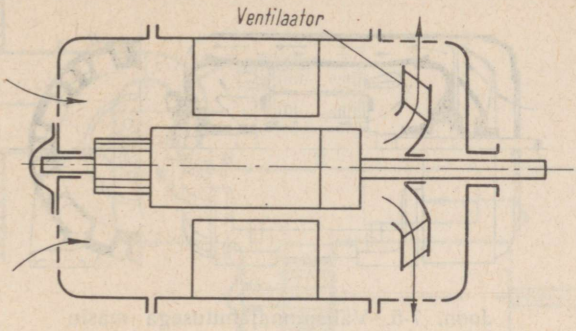
Eespool selgus, et mida paremini elektrimasinat jahutatakse, seda täielikumalt saab masina aktiivseid elemente ära kasutada. Soojushulk, mida on võimalik eemaldada elektrimasinast, sõltub masina ventilatsioonisüsteemist. Ventilatsioonisüsteem peab olema nii korraldatud, et võimalikult väikese ventilatsioonikao juures saavutada efektiivne jahutus.

Ventilatsiooni viisi järgi jaotatakse elektrimasinad loomuliku jahutusega, endajahutusega, välispinnajahutusega ja sõltumatu jahutusega masinateks.

Loomuliku jahutusega masinates ei ole jahutamise otstarbeks eriseadmeid. Parema jahtumise saavutamiseks suurendatakse vahel masina jahutuspinda, milleks masina kere varustatakse näi-

teks vertikaalselt asetatud ribidega. Selline jahutusviis on kasutusel ainult väga väikese võimsusega masinais.

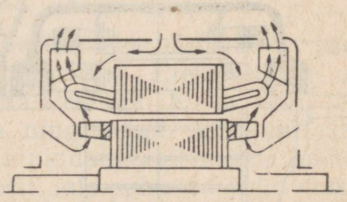
Endajahutusega masinaid jahutatakse ventilaatoriga, mis asub masinas endas ja on kinnitatud masina pöörleva osa külge. Ventilaator paneb masinas jahutusõhu liikuma, imedes külma õhku väljast sisse ning puhudes selle läbi masina. Sõltuvalt jahutusõhu liikumise suunast masinas eristatakse aksiaalset ja radiaalset ventilatsioonisüsteemi.



Joon. 7-3. Aksiaalne ventilatsioonisüsteem

Radiaalse ventilatsiooniga masina (joon. 7-4) südamik koostatakse üksikutest 4 ... 8 cm laiustest pakkidest, mille vahel on 10 mm laiused ventilatsioonikanalid.

Radiaalse ventilatsiooni eelisteks on tema suhteline lihtsus, ühtlane jahutamine, vähene energiakadu ventilatsiooniks, konstruktsiooni kindlus. Paheks on aga masina suuremad mõõtmed, sest ventilatsioonikanalite arvel muutub masin kuni 20% pikemaks. Teiseks puuduseks on suhteliselt väike soojuse äraandmine ning masinast läbijuhitava õhu hulga sõltuvus liikumatu ja pöörleva osa ventilatsioonikanalite vastastikusest asendist. Kui näiteks nimetatud kanalid on nihkunud üksteise suhtes aksiaalsihis 2 ... 3 mm võrra, väheneb masinat läbiv jahutusõhu hulk 20 ... 30%.



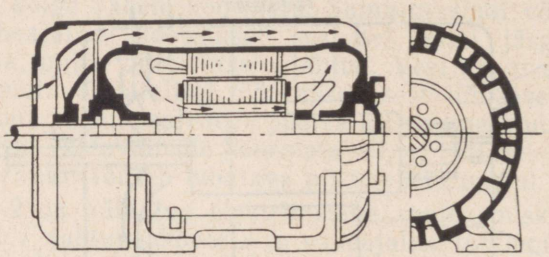
Joon. 7-4. Radiaalne ventilatsioonisüsteem

Aksiaalse jahutusega masinatel (joon. 7-3) võivad võlliga paralleelsed jahutuskanalid esineda nii liikumatul kui ka pöörleval masinaosal.

Aksiaalse süsteemi peamiseks puuduseks on masina ebaühtlane jahtumine piki võlli. Masin on külmem selles otsas, kus jahutus-

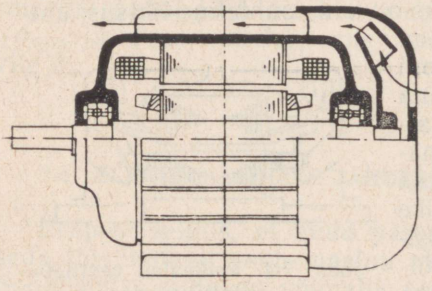
õhk suundub masinasse ja kuumem seal, kus õhk lahkub masinast. Sellest tingituna võivad pikkades masinates tekkida mehaanilised lisapinged. Seetõttu sobib aksiaalne ventilatsioon väikese ja keskmise võimsusega, radiaalne aga suure võimsusega masinatele.

Välispinnajahutus leiab kasutamist siis, kui masin on kinnise ehitusviisiga. Niisugusel juhul ei saa välisõhk kokku puutuda masina aktiivsete elementidega (mähise ja südamikuga). Jahutada saab masinat siis ainult välispinna kaudu. Kui jahtumine toimub



Joon. 7-5. Välispinnajahutusega masin

loomulikul teel, siis lahkub masinast vähe soojust ja masin kuumeneb ülemäära. Paremini saab masinat jahutada, kui puhuda õhku piki masina välispinda. Selleks asetatakse ventilaator ühte masina otsa võlli külge ning juhitakse õhk piki masina välispinda võlli sihis (joon. 7-5).



Joon. 7-6. Ribidega varustatud välispinnajahutusega masin

Kui masina võimsus on suur, siis varustatakse masina kere jahutuspinna suurendamiseks pikiribidega (joon. 7-6).

Sõltumatu jahutusega masinate jahutamine toimub eraldi ülesseatud oma ajamiga varustatud ventilaatori abil.

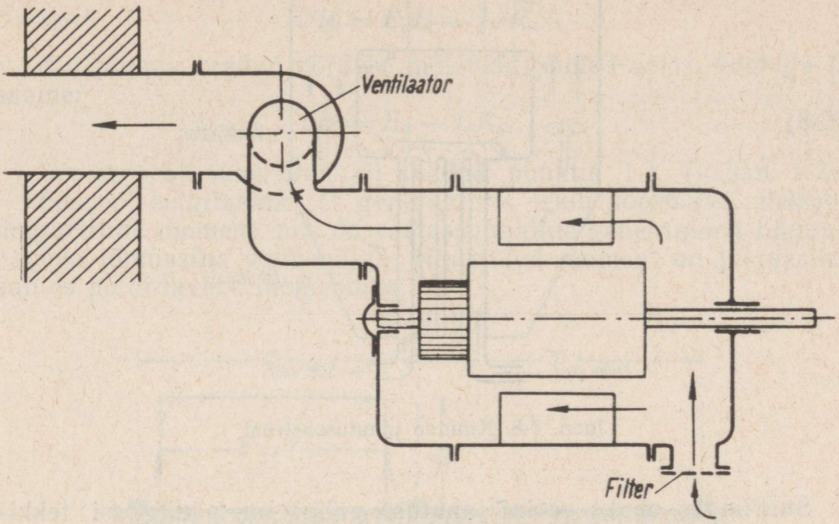
Ventilaatori pöörlemiskiiruse reguleerimisega saab sõltuvalt masina koormusest muuta ventilatsiooni intensiivsust. Nii saab tunduvalt vähendada ventilatsioonikadu.

Sõltumatu jahutusega masinad võivad olla varustatud kas läbitõmbe- või kinnise jahutussüsteemiga.

Läbitõmbe-jahutussüsteem on selline, kus masinast puhutakse läbi väljast võetav õhk, kuna masinas soojenenud õhk juhitakse ümbritsevasse keskkonda. Ventilaator on masinaga ühendatud

torustiku kaudu, kusjuures sissejuhitav õhk filtreeritakse, et vältida õhus leiduva tolmu sattumist masinasse (joon. 7-7).

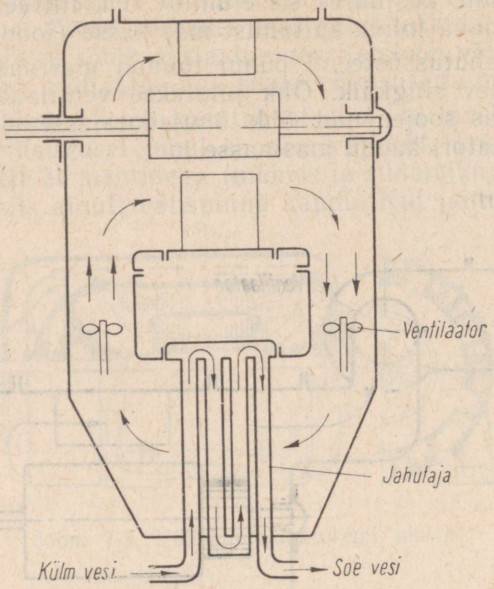
Kinnise jahutussüsteemi puhul toimub masinas ühe ja sama õhuhulga pidev ringkäik. Õhk juhitakse ventilaatori abil masinasse, masinas soojenenud õhk õhujahutajasse, jahutatud õhk uuesti ventilaatori kaudu masinasse jne.



Joon. 7-7. Läbitõmbejahutusega masin

Niisugust kinnist jahutussüsteemi kasutatakse tänapäeval peamiselt võimsate sünkroonmasinate jahutamisel. Elektrimasin on niisugusel juhul ümbritsetud õhukindla kestaga. Kuna tihti sellised masinad on suurte mõõtmetega ning pikad, siis juhitakse jahutusõhk masinast läbi vastavate juhtpindade abil mitme joana, kusjuures kasutatakse kahte ventilaatorit, mis puhuvad õhku masinasse kahelt poolt (joon. 7-8).

Elektrimasinate hõõrdekadude hulka loetakse ka ventilatsioonikadu. Nagu selgub, on kinnise ventilatsioonisüsteemi puhul need kaod eriti suured, ulatudes mõnikord 50%-ni masina kadude kogusummast. Et suurendada masina kasutegurit ja vähendada ventilatsioonikadu, on võetud kasutusele kinnise õhkjahutuse asemele vesinikjahutus. Vesiniku kasutamisel jahutuskeskkonnana paraneb ka soojusülekanne. Vesiniku erikaal on õhuga võrreldes 14 korda väiksem, soojusjuhtivus aga 7 korda suurem. Soojuse siirdetegur pinnaühikule on vesiniku puhul 30% suurem kui õhus, mistõttu sama ületemperatuuri puhul saab masina võimsust vesinikjahutuse puhul tõsta 25 . . . 30%.



Joon. 7-8. Kinnine jahutussüsteem

Suurimaks ohuks vesinikjahutuse puhul on paukgaasi tekkimise võimalus vesiniku ja õhu segunemisel. Selle vältimiseks hoitakse tavaliselt rõhk masinat ümbritsevas kestas veidi kõrgem atmosfääri rõhust.

VIII PEATÜKK

ALALISVOOLUMASIN GENERAATORINA

8-1. ALALISVOOLUGENERAATORI ISELOOMUSTUS

Mehaaniline energia muundamine elektrienergiaks on alati seotud kadudega, mistõttu generaatorist saadav elektrienergia on alati väiksem generaatori võllile jõumasina poolt antavast mehaanilisest energiast. Joonisel 6-1 antud generaatori energeetilisest diagrammist järeldub, et

$$P_2 = P_{em} - (P_{av} + P_h), \qquad (8\text{-}1)$$

kus P_2 — kasulik elektriline võimsus, mis saadakse generaatorist,
P_{em} — elektromagnetiline võimsus,
P_{av} — vaseskaod ankru mähises,
P_h — kaod harjades.

Teatavasti $P = UI_a$, $P_{em} = E_a I_a$ ja

$$P_{av} + P_h = I_a^2 r_a + 2\Delta U I_a = I_a^2 \left(r_a + \frac{2\Delta U}{I_a} \right) = I_a^2 R_a,$$

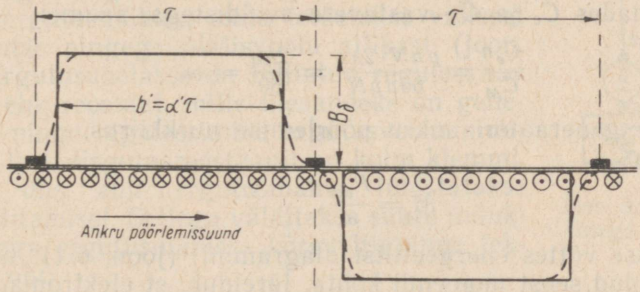
kus R_a on ankru vaseskaost ja harjade kaost sõltuv ühine ankrutakistus. Seega võime valemi (8-1) kirjutada järgmiselt:

$$UI_a = E_a I_a - I_a^2 R_a.$$

Kui jagada saadud võrduse mõlemad pooled ankru vooluga I_a saame:

$$U = E_a - I_a R_a. \qquad (8\text{-}2)$$

See seos oli juba üldkujul saadud punktis 1-1 (valem 1-3). Eespool selgitasime, et generaatoris tekib koormusel elektromagnetiline moment, mis on vastassuunaline generaatorit liikuma paneva jõumasina momendiga. Nimetatud moment on jõumasina suhtes pidurdavaks momendiks.



Joon. 8-1. Generaatori magnetvälja jaotuse arvutuslik kuju

Määrame selle momendi, lähtudes magnetvälja kujust joonisel 2-3. Kujutame sellele vastavalt generaatori magnetvälja jaotuse koos ankru juhtmetega (joon. 8-1). Sellelt jooniselt näeme, et otsitav moment tekib $N\alpha'$ juhtmes oleva voolu mõjul. Seega

$$M = M' N\alpha' = B_\delta l i_a \frac{d}{2} N\alpha',$$

kus M' — ühele ankru mähise juhtmele mõjuv moment,
d — ankru läbimõõt.
Teiselt poolt on teada, et

$$\frac{d}{2} = \frac{\pi d}{2\pi} = \frac{2p\tau}{2\pi} = \frac{p\tau}{\pi} \quad \text{ja} \quad i_a = \frac{I_a}{2a}.$$

Siit järeldub, et

$$M = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a} B_\delta l\alpha' \tau I_a = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a} \Phi I_a. \qquad (8\text{-}3)$$

Seega on generaatori elektromagnetiline moment võrdeline peamagnetvooga Φ ja ankru vooluga I_a, sest olemasolevas masinas on $\frac{p}{2\pi} \cdot \frac{N}{a} = C_M = \text{const}$, s. t.

$$M = C_M \cdot \Phi I_a. \qquad (8\text{-}4)$$

Näitame, et moment on seotud elektrimagnetilise võimsusega P_{em}. Valemi (3-29) kohaselt $E = C_e \Phi n$, kus $C_e = \frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a}$.

Sellest valemist $\Phi = \frac{E}{C_e n}$. Kui asetada see Φ avaldis valemisse (8-4), saame:

$$M = \frac{C_M E I_a}{C_e n} = \frac{E I_a}{\frac{C_e n}{C_M}} = \frac{P_{em}}{\frac{C_e n}{C_M}}.$$

Asendades C_e ja C_M vastavate avaldistega, saame:

$$\frac{C_e n}{C_M} = \frac{p n N \cdot 2\pi a}{60 a p N} = \frac{2\pi n}{60} = \omega,$$

kus ω — generaatori ankru pöörlemise nurkkiirus.

Seega

$$M = \frac{P_{em}}{\omega}. \qquad (8\text{-}5)$$

Arvesse võttes energeetilist diagrammi (joon. 6-1) ning viimati saadud seost momendi kohta, järeldub, et elektromagnetiline võimsus on määravaks suuruseks, mille arvel saadakse kasulik võimsus generaatoris.

Jõumasina poolt arendatav mehaaniline moment peab suuruselt ületama generaatori elektromagnetilise momendi. Kui generaator töötab tühijooksul, siis on tema elektromagnetiline moment võrdne nulliga, sest ankru vool on null (vaata valem 8-4). Kuid et tühijooksul generaator pöörleks, peab jõumasin arendama momendi, mis ületaks generaatoris tühijooksul esinevaid pidurdavaid momente. Viimased on tingitud hõõrde- ja rauaskadudest. Nimetatud põhjustest tingitud summaarset momenti nimetatakse *tühijooksumomendiks* M_0. Kui generaator pöörleb püsiva kiirusega ($n = \text{const.}$), siis ka tühijooksumoment M_0 on püsiv, sest nii hõõrde- kui ka rauaskadu sõltub pöörlemiskiirusest (vt. p. 6-4 ja 6-5). Koormusel tuleb peale elektromagnetilise momendi M ületada ka tühijooksumoment M_0. Sellepärast peab jõumasina poolt arendatav moment M_1 olema võrdne, kuid vastassuunaline pidurdavate momentide summaga $M + M_0$:

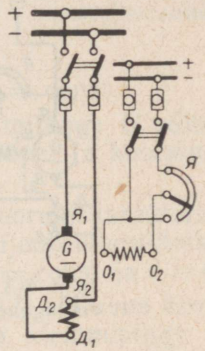
$$M_1 = -(M + M_0). \qquad (8\text{-}6)$$

Kui M ja M_0 all mõista jõumasina momendi komponente, mis tasakaalustavad vastavaid generaatori pidurdavaid momente, võib valemi (8-6) kirjutada ka kujul

$$M_1 = M + M_0. \qquad (8\text{-}7)$$

8-2. ALALISVOOLUGENERAATORITE LIIGITUS

Alalisvoolugeneraatoril on vähemalt kolm mähist: ankru, ergutus- ja lisapooluste mähis. Ankru ja lisapooluste mähised on alati ühendatud järjestikku. Ergutusmähis võib ühendatud olla mitmel viisil. Sõltuvalt ergutusmähise ühendusviisist võime alalisvoolugeneraatorid liigitada 1) *võõrergutusega* ja 2) *endaergutusega generaatoriteks.*



Joon. 8-2. Võõrergutusega generaator

Võõrergutusega generaatorid võivad olla elektromagnetilise ergutusega või varustatud püsivmagnetitega. Esimesel juhul omab generaator ergutusmähise, mida toidetakse välisest konstantse pingega alalisvoolu allikast (joon. 8-2). Ergutusahelasse on lülitatud reguleeritav takisti ehk reostaat, mille ülesandeks on generaatori pinge reguleerimine ergutusvoolu muutumise teel. Ergutusreostaadil on kolm klemmi, millest ühe abil ergutusmähis lühistatakse väljalülitamisel. Sellega välditakse suure induktiivsusega ergutusmähises kõrge liigpinge tekkimise oht.

Alalisvoolumasinate klemmid tähistatakse standardi kohaselt järgmiselt.

Mähise nimetus	Mähise algus	Mähise lõpp
Ankru mähis	$Я_1$	$Я_2$
Kompensatsioonimähis	K_1	K_2
Lisapooluste mähis	$Д_1$	$Д_2$
Peavoolu-ergutusmähis	C_1	C_2
Haruvoolu-ergutusmähis	$Ш_1$	$Ш_2$

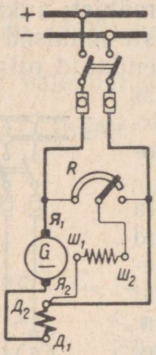
Endaergutusega generaatorid liigitatakse sõltuvalt ergutamise viisist *haruvoolu-, peavoolu-* ja *segaergutusega* ehk *kompaundgeneraatoriteks.*

Haruvoolugeneraatori ergutusmähis ühendatakse paralleelselt ankru mähisega. Haruvoolugeneraator on kõige levinumaks alalisvoolugeneraatori tüübiks (joon. 8-3).

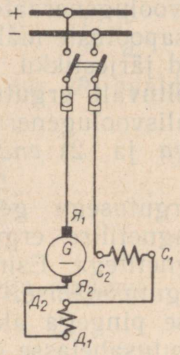
Ergutusmähis omab palju peenest traadist keerde ja on seega

suhteliselt suure takistusega. Ergutusvool on võrreldes ankruvooluga nõrk, moodustades 1 . . . 3% ankruvoolust.

Peavoolugeneraatori ergutusmähis ühendatakse järjestikku ankru mähisega; seega on ankru vool ühtlasi ka ergutusvooluks. Seetõttu on peavoolu-ergutusmähisel väike keerdude arv ja suur juhtmete ristlõikepind. Peavoolugeneraatoreid kasutatakse vähe (joon. 8-4).



Joon. 8-3. Haruvoolugeneraator



Joon. 8-4. Peavoolugeneraator

Segaergutusega ehk kompaundgeneraatoril on kaks ergutusmähist samadel pooluste südamikel: haruvoolu- ja peavoolu-ergutusmähis. Ergutusmagnetvälja põhiosa tekitatakse haruvoolu-ergutusmähisega. Peavoolu-ergutusmähis on lisaergutusmähiseks. Haruvoolu-ergutusmähist võib seejuures ühendada kahel viisil: «*pika*» või «*lühikese*» ühendusega. «Pikk» ühendus tekib siis, kui ergutusmähise üks ots ühendatakse võrgupoolse peavoolu-ergutusmähise klemmi külge. «Lühike» ühendus tekib aga juhul, kui ergutusmähise ots on ühendatud lisapooluste ja peavoolu-ergutusmähise ühendusjuhtme külge. Joonisel 8-5 on viimane näidatud punktiiriga. Nimetatud ühendusviiside vahel ei ole olulist erinevust. Kompaundgeneraatori pinge on teatud ergutusmähiste ühendusviisi puhul koormustest praktiliselt sõltumatu, nagu lähemalt selgitame allpool.

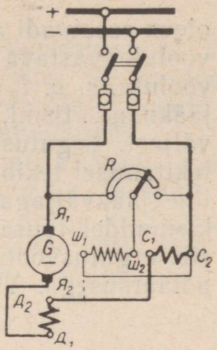
Masina nimisildile märgitakse nimirežiimile vastavad suurused, nagu nimipinge, nimivool, nimivõimsus, nimipöörlemiskiirus jne.

Generaatorite nimivõimsuse all mõistetakse kasulikku elektrilist võimsust masina klemmidel, mis alalisvoolugeneraatoritel on väljendatud vattides või kilovattides ja vahelduvvoolugeneraatoritel voltamprites või kilovoltamprites.

Mootori nimivõimsuseks nimetatakse kasulikku mehaanilist võimsust masina võllil, väljendatuna vattides või kilovattides.

Generaatorite omadusi iseloomustavad peale nimisuuruste veel *karakteristikud.* Karakteristik on kõver, mis näitab graafiliselt generaatori mingi iseloomuliku suuruse sõltuvust teisest, kui seejuures ülejäänud suurused on püsivad.

Karakteristiku konstrueerimiseks vajalikud andmed saadakse katselisel teel, kusjuures generaatorite puhul on pöörlemiskiirus n konstantne.



Joon. 8-5. Kompaundgeneraator

Generaatorite puhul määratakse tavaliselt järgmised karakteristikud:

1. *Väliskarakteristik* on generaatori klemmipinge U sõltuvus koormusvoolust I, kui pöörlemiskiirus $n = \text{const}$ ja ergutusahela takistus $r_e = \text{const}$.

2. *Koormuskarakteristik* on generaatori klemmipinge U sõltuvus ergutusvoolust I_e, kui pöörlemiskiirus $n = \text{const}$ ja koormusvool $I = \text{const}$.

3. *Tühijooksukarakteristik* on generaatori koormuskarakteristiku erijuht, kui koormusvool $I = 0$. Seega tühijooksukarakteristik kujutab endast funktsiooni $U_0 = f(I_e)$ kui $n = \text{const}$ ja $I = 0$.

4. *Reguleerimiskarakteristik* on ergutusvoolu I_e sõltuvus koormusvoolust I, kui pöörlemiskiirus $n = \text{const}$ ja klemmipinge U muutumise iseloom on ette antud. Enamasti hoitakse klemmipinge konstantne.

5. *Lühisekarakteristik* on reguleerimiskarakteristiku erijuht, kui $U = 0$. Seega lühiskarakteristik on funktsioon $I_l = f(I_l)$, kui $n = \text{const}$ ja $U = 0$.

Lühisekarakteristik võimaldab määrata mõningaid generaatori omadusi.

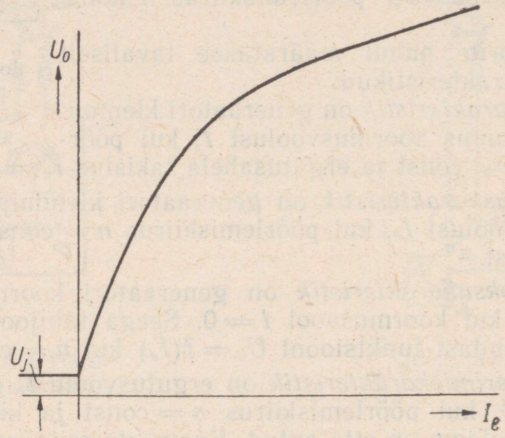
Üksikute generaatoritüüpide vaatlemisel anname alljärgnevalt ka neid iseloomustavad karakteristikud.

8-3. VÕÕRERGUTUSEGA GENERAATOR

Võõrergutusega generaatori skeem oli antud joonisel 8-2. Tutvume võõrergutusega generaatori mõningate omadustega tema karakteristikute abil.

Tühijooksukarakteristiku ülesvõtmiseks koostatakse lülitus (joon. 8-2), kus tuleb ette näha mõõteriistad ergutusvoolu I_e ja masina klemmipinge U_0 mõõtmiseks. Katse teostamisel peab olema võrgulüliti avatud. Generaator pannakse pöörlema konstantse nimikiirusega. Harjad peavad olema neutraaljoonel. Ergutusahelas

oleva reostaadi abil muudame ergutusvoolu, mõõtes igale ergutusvoolule vastava klemmipinge U_0. Katset alustatakse ergutusvooluta, s. o. $I_e = 0$. Kui masina pooluste südamikud omavad jääkmagnetismi, siis tekib ankrus väike emj., mis on tingitud jääkväljast. Ergutusahela sulgemisel ja ergutusmähises nõrga voolu tekitamisel tekib nõrk ergutusväli. Kui ergutusväli on samasuunaline jääkväljaga, siis tugevneb resulteeriv väli ja pinge masina klemmidel tõuseb. Vastupidisel juhul esiteks pinge langeb ning siis ergutusvoolu tugevnemisel hakkab jälle tõusma vastupidise polaarsusega. Tühijooksukatse jooksul tugevdame pidevalt ergu-



Joon. 8-6. Tühijooksukarakteristik

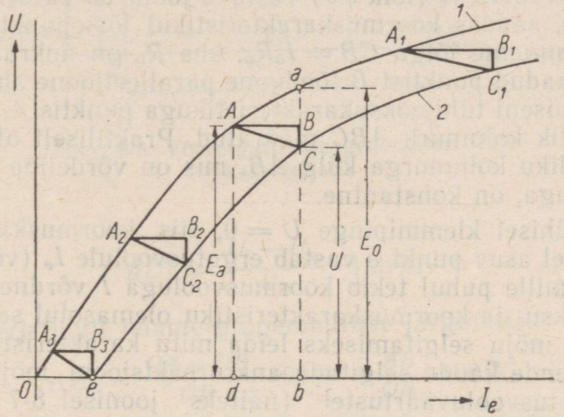
tusvoolu I_e, alustades väärtusest $I_e = 0$. Katse kestel ei tohi ergutusreostaati kunagi tagasi keerata, sest siis satume hüstereesikõvera teisele harule. Tühijooksukarakteristik on iseloomulik masina magnetahelale ja ta on ühtlasi masina magneetimiskõveraks (vt. joon. 2-8), sest tühijooksul on masina klemmipinge U_0 võrdne elektromotoorse jõuga E ankrus, viimane on aga võrdeline magnetvooga Φ (vt. valem 3-29). Ergutusvool I_e on aga võrdeline magneetimisergutusega. Seega kõver $U_0 = f(I_e)$ on ühtlasi vastavas mõõtkavas kõver $\Phi = f(F)$ (joon. 8-6).

Tühijooksukarakteristikult leiame jääkmagnetväljast tingitud pinge U_j, mis on tavaliselt 1 ... 3% nimipingest. Nimipingele vastav punkt tühijooksukarakteristikul peab asuma kõvera «põlvel». Masina pinge ei ole püsiv, kui punkt asub kõvera sirgjoonelisel osal, sest väiksemgi ergutusvoolu muutus põhjustab suure pinge muutuse. Üle põlve asuval kõvera osal on pinge reguleerimine piiratud, sest ergutusvoolu muutmisel muutub masina pinge suhteliselt vähe.

Koormuskarakteristik määratakse sama lülitusega kui tühijook-

sukarakteristik, lisaks on ainult ampermeeter koormusvoolu I mõõtmiseks. Katse ajal on võrgulüliti suletud ning generaator annab võrku elektrienergiat. Katse teostamisel peab olema pöörlemiskiirus konstantne ja koormusvool võrduma nimivooluga.

Koormusel on generaatori klemmipinge U alati väiksem kui elektromotoorne jõud E, sest ankrus tekib pingelang $I_a r_a$ ja ankrureaktsiooni tõttu väheneb magnetvoog ning seega ka ankru emj. E_a (vt. p. 4-4). Nimetatud tegureid saame arvesse võtta järgmise graafilise konstruktsiooniga. Selleks lähtume tühijooksukõ-



Joon. 8-7. Karakteristlik kolmnurk ja koormuskarakteristik

verast, millel võtame aluseks teatud emj. E_0 (joon. 8-7, kõver *1*, lõik *ab*). Sellele elektromotoorsele jõule vastab ergutusvool $I_e \equiv Ob$.

Nagu ülal mainisime, tekib koormusel ankrureaktsiooni lahtimagneetiv mõju, mille tõttu resulteeriv magneetimisergutus väheneb. Sellele vastab joonisel 8-7 lõik *bd* ergutusvoolu mõõtkavas. Seega koormusel on generaatori resulteeriv magneetimisergutus võrdeline lõiguga $Od = Ob - bd$, ning selle vastav emj. E_a võrdeline lõiguga $E_a = dA = bB$. Lisaks eelmisele tekib ankru mähises veel pingelang $I_a R_a$, mida võtame arvesse selle pingelanguga võrdelise lõigu BC näol, vähendades selle võrra ankru emj. E_a suurust. Siit saame lõpuks masina klemmipinge koormusel U võrdelisena lõigule $bC = bB - BC$ ehk $U = E_a - I_a R_a$. Lõik aC on võrdeline koormusvoolust $I = I_a$ tekkinud pingelanguga ankru mähises ergutusvoolu I_e puhul. Kui tõmbame punktist B paralleeljoone abstsissteljele AB ning ühendame punktid A ja C, saame täisnurkse kolmnurga ABC, mille külg BC on võrdeline pingelanguga ankru mähises ja külg AB — ankrureaktsiooni lahtimagneetiva mõjuga. Niisugune kolmnurk kannab karakteristliku (iseloomuliku) kolm-

nurga nimetust. Kui $I = \text{const}$, siis jääb ka selle kolmnurga külg BC peaaegu muutumatuks, sest pingelang I_aR_a sõltub praktiliselt ainult voolust I_a. Külg AB aga muutub, sest ta, olles võrdeline ankrureaktsiooni lahtimagneetiva mõjuga, sõltub küllastusest. Seepärast mida suurem on ergutusvool, seda suurem on masina küllastus ja seda suurem on ka kolmnurga külg AB (võrdle kolmnurkade $A_1B_1C_1$ ja $A_2B_2C_2$ külgi: $A_1B_1 > AB > A_2B_2$, kuna $B_1C_1 = BC = B_2C_2$).

Eelnevast järeldub, et tühijooksu- ja koormuskarakteristiku järgi saame leida karakteristiku kolmnurga. Selleks tõmbame teatud ergutusvoolule I_e (lõik Ob) vastava joone ab paralleelselt ordinaatteljega, saades koormuskarakteristikul lõikepunkti C. Sellest punktist kanname lõigu $CB = I_aR_a$, kus R_a on ankruahela kogutakistus. Saadud punktist B tõmbame paralleeljoone abstsissteljele kuni lõikumiseni tühijooksukarakteristikuga punktis A. Seega ongi karakteristlik kolmnurk ABC määratud. Praktiliselt oletatakse, et karakteristliku kolmnurga külg AB, mis on võrdeline ankrureaktsiooni mõjuga, on konstantne.

Kuna lühisel klemmipinge $U = 0$, siis koormuskarakteristiku abstsissteljel asuv punkt e vastab ergutusvoolule I_e (võrdeline lõiguga $\overline{oe}$), mille puhul tekib koormusvooluga I võrdne lühisvool.

Tühijooksu- ja koormuskarakteristiku olemasolul saame ankrureaktsiooni mõju selgitamiseks leida mitu karakteristlikku kolmnurka ja nende kaudu selgitada ankrureaktsiooni mõju mitmesugustel ergutusvooluväärtustel (näiteks joonisel 8-7 lõigud AB, A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3). Kui ehitada koormuskarakteristikud mitmesuguste koormusvoolude kohta, võib saada veelgi täielikuma pildi ankrureaktsiooni mõjust masina klemmipingele.

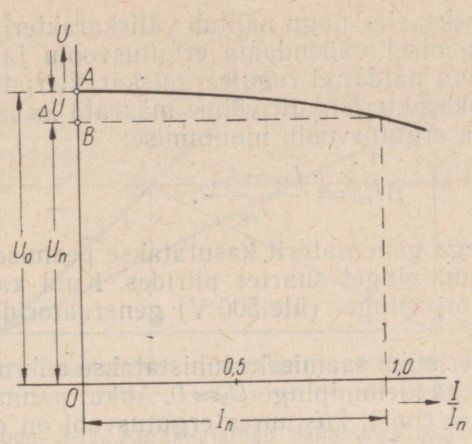
Väliskarakteristik saadakse, juhul kui masina $n = \text{const}$ ja $r_e = \text{const}$. Viimane tingimus võõrergutusega masina puhul on sama mis $I_e = \text{const}$. Katse teostatakse joonisel 8-2 antud skeemi alusel, kusjuures mõõdetakse masina klemmipinget U ja koormusvoolu I.

Karakteristiku ülesvõtmiseks paneme generaatori pöörlema nimipöörlemiskiirusega ning reguleerime ergutusmähises niisuguse ergutusvoolu I_e, mille juures nimikoormusvoolu $I = I_a$ puhul oleks generaatori klemmidel nimipinge $U = U_r$. Seejärel vähendame koormust kuni tühijooksuni. Kuna sel juhul väheneb pingelang IR_a ankru mähises ning ankrureaktsiooni lahtimagneetiv mõju, siis suureneb masina klemmipinge U kuni väärtuseni U_0 (joon. 8-8).

ГОСТ 183-55 alusel loetakse võõrergutusega generaatori *nimipinge muutuseks* tema klemmipinge muutust, kui koormus muutub nimikoormusest kuni nullini.

Seega saadud karakteristiku alusel leiame pingemuutuse vastava lõiguna (AB joonisel 8-8).

Tavaliselt väljendatakse pingemuutus nimipinge protsentides, s. o.



Joon. 8-8. Võõrergutusega generaatori väliskarakteristik

$$\Delta U_n = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\%. \qquad (8\text{-}8)$$

Karakteristikult leiame pingemuutuse järgmiselt:

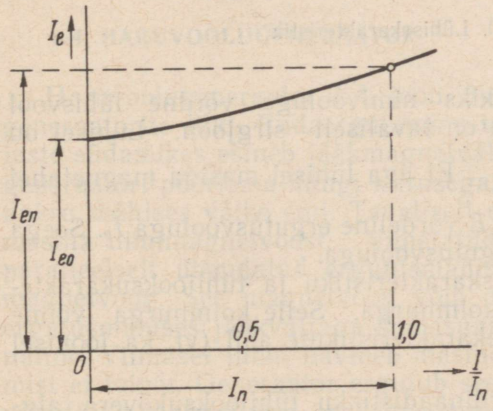
$$\Delta U_n = \frac{OA - OB}{OB} \cdot 100\% = \frac{AB}{OB} \cdot 100\%.$$

Kompensatsioonimähiseta võõrergutusega generaatorites on

$$\Delta U_n = 5 \ldots 15\%.$$

Reguleerimiskarakteristik saadakse, kui $n = \text{const}$ ja $U = \text{const}$.

Kuna generaatori klemmipinge peab muutuval koormusel



Joon. 8-9. Võõrergutusega generaatori reguleerimiskarakteristik

jääma konstantseks, siis, nagu nähtub väliskarakteristikust, peame koormuse vähenemisel vähendama ergutusvoolu ja vastupidi.

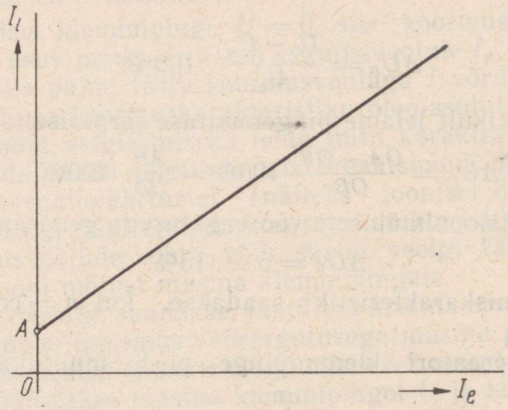
Joonisel 8-9 on näidatud reguleerimiskarakteristik.

Reguleerimiskarakteristikult võime määrata ka koormuse muutumisele vastava ergutusvoolu muutumise:

$$\Delta I_{en} = \frac{I_{en} - I_{eo}}{I_{eo}}. \qquad (8\text{-}9)$$

Võõrergutusega generaatorit kasutatakse peamiselt siis, kui on vaja muuta klemmipinget suurtes piirides. Kuid ka madalpinge- (4 ... 12 V) ja kõrgepinge- (üle 500 V) generaatorid on tihti võõrergutusega.

Lühisekarakteristiku saamiseks lühistatakse ankru klemmid läbi ampermeetri. Seega klemmipinge $U \approx 0$. Ankur pannakse pöörlema nimikiirusega $n = \text{const}$, kusjuures ergutusvool on esmalt võrdne nulliga ($I_e = 0$). Siis indutseerub ankru mähises jääkmagnetvälja tõttu õige väike emj. ning lühistatud ankrumähises tekib lühisvool $I_l = Oa$ (joon. 8-10). Seejärel suurendatakse ettevaatlikult ergu-

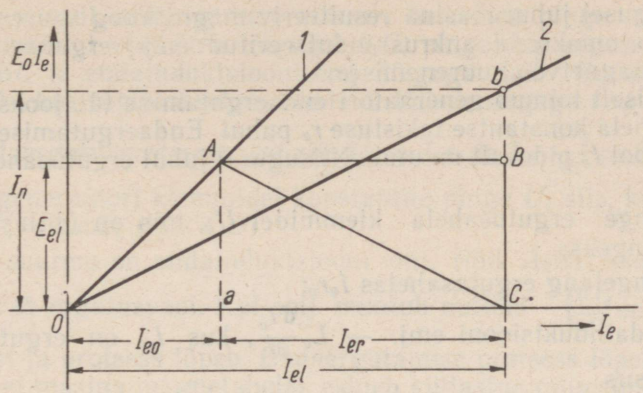


Joon. 8-10. Lühisekarakteristik

tusvoolu I_e nii, et ankrus tekiks nimivooluga võrdne lühisvool ($I = I_n$). Lühisekarakteristik on tavaliselt sirgjoon. Lühisel on $E = I_l R_a$ ning seega $I_l = \frac{E}{R_a}$. Et aga lühisel masina magnetahel on küllastamata, siis on emj. E võrdeline ergutusvooluga I_e. Seega on ka lühisvool võrdeline ergutusvooluga.

Eespool leidsime koormuskarakteristiku ja tühijooksukarakteristiku abil karakteristliku kolmnurga. Selle kolmnurga võime leida ka tühijooksu- ja lühisekarakteristikute abil (vt. ka joonisel 8-7 kolmnurk A_3B_3e).

Selleks kanname ristkoordinaadistikku tühijooksukõvera alg-



Joon. 8-11. Karakteristliku kolmnurga ehitamine

osa (sirge *1* joonisel 8-11). Kui lühisvool I_l on võrdne nimivooluga I_n, siis lühisel emj. E_{el} ankrus on võrdne pingelanguga ankrus $I_n R_a$. Kandes E_{el} ordinaatteljele, leiame tühijooksukarakteristikult vastava ergutusvoolu I_{eo}. Lõik Aa kujutab aga karakteristliku kolmnurga ühte kaatetit, mis on võrdeline pingelanguga ankru mähises. Ankrureaktsiooni mõju määramiseks peame samale joonisele kandma lühisekarakteristiku, nihutades teda koordinaatide algusesse (v. joonisel 8-11 kõver *2*). Voolule $I_l = I_n$ (lõik bC joonisel 8-11) vastab ergutusvool I_{el} (lõik OC). Kui ankrureaktsiooni ei ole (tühijooks), siis ergutusvool on I_{eo}. Järelikult vahe $I_{el} - I_{eo}$ on ankrureaktsiooniga võrdeline ergutusvoolu väärtus I_{er}. Seega lõik $AB = aC$ on karakteristliku kolmnurga teine kaatet, mis võtab arvesse ankrureaktsiooni mõju. Ühendades omavahel punktid A ja C leiamegi karakteristliku kolmnurga ABC.

8-4. HARUVOOLUGENERAATOR

Haruvoolugeneraator (vt. joon. 8-3) kuulub endaergutusega generaatorite liiki. Endaergutamine toimub siis, kui masina pooluste südamikes esineb jääkmagnetväli. Sellisel juhul, kui paneme generaatori pöörlema mingi kiirusega, tekib jääkmagnetvoo mõjul ankru mähises väike emj. Tavaliselt on jääkmagnetvoog 1 ... 3% masina nimimagnetvoost. Nimetatud emj. mõjul tekib ankruga paralleelselt ühendatud ergutusmähises vool ja samuti ergutusmagnetvoog. See magnetvoog võib olla sõltuvalt voolu suunast ergutusmähises jääkväljaga samasuunaline või sellele vastassuunaline. Viimasel juhul hävineb masina magnetväli ja endaergutamist ei toimu. Generaator ergutub seega ainult siis, kui mõlemad nimetatud magnetvood on samasuunalised.

Niisugusel juhul masina resulteeriv magnetvoog suureneb, mis põhjustab omakorda ankrus indutseeritud emj., ergutusvoolu ja masina magnetvoo suurenemise.

Tavaliselt toimub generaatori endaergutamine tühijooksul ning ergutusahela konstantse takistuse r_e puhul. Endaergutamise käigus ergutusvool I_e pidevalt muutub. Niisugusel juhul ergutusahelas esinevad:

1) pinge ergutusahela klemmidel U_e, mis on ühtlasi ankru klemmipingeks;

2) pingelang ergutusahelas $I_e r_e$;

3) endainduktsiooni emj. $-L_e \frac{\mathrm{d}I_e}{\mathrm{d}t}$, kus L_e on ergutusahela induktiivsus.

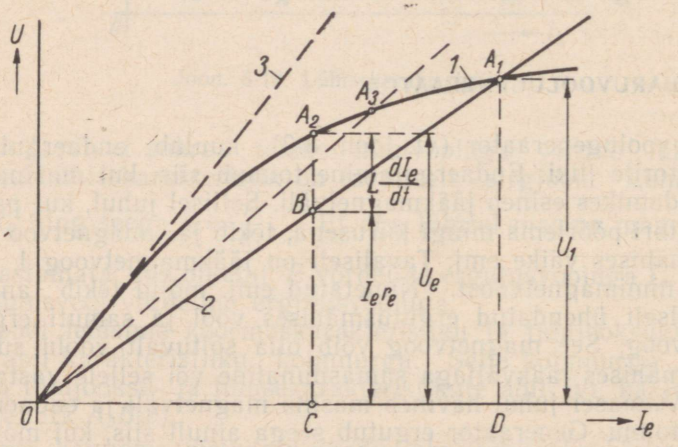
Kirchhoffi teise seaduse alusel võime seega kirjutada ergutusahela kohta järgmise võrduse:

$$U_e - L_e \frac{\mathrm{d}I_e}{\mathrm{d}t} = I_e r_e,$$

ehk

$$U_e = I_e r_e + L_e \frac{\mathrm{d}I_e}{\mathrm{d}t}. \qquad (8\text{-}10)$$

Endaergutusprotsess kestab seni, kuni ergutusahela klemmipinge U_e, mis on ühtlasi masina klemmipingeks, osutub võrdseks muutuvast ergutusvoolust I_e tingitud pingelanguga ergutusahelas $I_e r_e$. Kuna sõltuvus $U_e = f(I_e)$ kujutab endast graafiliselt generaatori tühijooksukarakteristikut, siis endaergutusprotsessi kulgemist võime graafiliselt kujutada tühijooksukarakteristiku ja sirge $I_e r_e = f(I_e)$ abil (joon. 8-12).



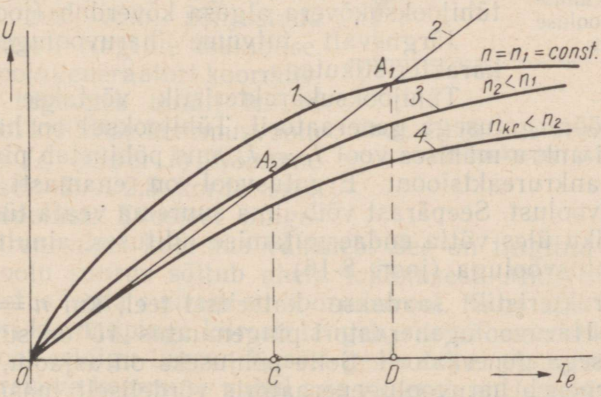
Joon. 8-12. Haruvoolugeneraatori endaergutamine

Seega mingil endaergutusprotsessi hetkel on pinge ergutusahela klemmidel võrdeline lõiguga A_2C, pingelang ergutusahelas lõiguga BC ja endainduktsiooni emj. lõiguga A_2B. On ilmne, et punktis A_1, kus tühijooksukarakteristik lõikub sirgega $I_e r_e = f(I_e)$, lõpeb endaergutusprotsess, sest siis $U_e = I_e r_e$ ja $L_e \frac{dI_e}{dt} = 0$. Seega kujuneb generaatori klemmidel konstantne pinge U_1 siis, kui ergutusvool $I_e = \text{const}$ (lõik OD).

Mida suurem on endainduktsiooni emj. (lõik A_2B), seda kiiremini kasvab ergutusvool. Kui emj. muutub nulliks $\left(\frac{dI_e}{dt} = 0\right)$, siis $I_e = \text{const}$ ja protsess lõpeb. Endaergutamise protsess lõpeb ainult seetõttu, et masina magnetahelas esineb küllastus ning tühijooksukarakteristik ei ole lineaarne.

Eelnevast on selge, et endaergutamisprotsessi kulgemise iseloom sõltub ergutusahela takistusest r_e ja masina pöörlemiskiirusest n. Viimasest sõltub masina ankrus indutseeritava emj. suurus ning tühijooksukarakteristiku iseloom. Kui suurendame ergutusahela takistust, muutub ergutusahela pingelangu sirge (kõver *2*) tõus järsemaks ja tema lõikepunkt tühijooksukõveraga nihkub madalamate pingete poole (punkt A_3). Pöörlemiskiiruse hoiame konstantse. Teatud ergutusahela takistuse puhul sirge $I_e r_e = f(I_e)$ muutub tühijooksukarakteristikule puutujaks (kõver *3*). Niisugusel juhul endaergutamist ei toimu. Takistust, mille juures masin enam ei ergutu, nimetatakse kriitiliseks ($r_{e\,kr}$).

Muutes masina pöörlemiskiirust n ergutusahela konstantse takistuse r_e korral, ei teki endaergutamist teatud kriitilise pöörlemiskiiruse juures, kui sirge $I_e r_e = f(I_e)$ osutub nimetatud kiirusele vastavale tühijooksukarakteristikule puutujaks (kõver *4* joonisel 8-13).



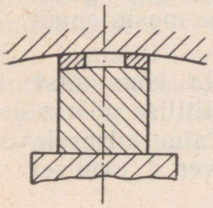
Joon. 8-13. Kriitiline pöörlemiskiirus endaergutamisel

Endaergutamine toimub sarnaselt eelmisele ka segaergutusega generaatorite puhul, sest viimastes on põhiergutusmähiseks haruvoolu-ergutusmähis. Peavoolugeneraatori endaergutamine toimub ainult siis, kui ahel on suletud, sest vastasel juhul koormusvool ja seega ka ergutusvool on võrdne nulliga.

Alalisvoolugeneraator ei ergutu siis, kui ergutusmähise otsad on valesti ühendatud, s. t. kui jääkväljast tingitud ankru emj. tekitab ergutusvoolu, mis mõjub jääkväljale vastu. Ergutusmähise õige ühenduse kindlaksmääramine toimub järgmiselt. Tundliku voltmeetri abil mõõdame pöörleva masina jääkväljast tingitud ankrupinget, kui ergutusahel on katkestatud. Kui seejärel ergutusahela sulgemisel ankru pinge tõuseb, on ergutusmähis õigesti ühendatud. Vastasel juhul tuleb ergutusahela otsad ümber ühendada. Ankru pöörlemissuuna muutumine annab sama tulemuse.

Ergutusahelasse järjestikku ühendatud ergutusreostaadi takistuse vähendamisel tõuseb ankru pinge kiiresti. Tavaliselt on võimalik ergutusreostaadiga pinget reguleerida 80 kuni 120% piirides. Alalisvoolugeneraator ei ergutu siis, kui ergutusahela takistus r_e on suurem kui kriitiline ($r_{e\,kr}$) või ahel on hoopis katkestatud ($r_e = \infty$). Liiga väikese pöörlemiskiiruse korral võib alalisvoolugeneraator samuti mitte ergutuda.

Sünkroongeneraatorite ergutusmasinad peavad võimaldama reguleerida pinget veel suuremal määral, mõnikord isegi 10 kuni 100% piirides. Seda saavutatakse nn. küllastussillakeste abil pooluste südamikus. Sel puhul vähendatakse osaliselt pooluse südamiku ristlõikepinda, milleks ikke ja pooluse südamiku vahele asetatakse mõne millimeetri paksune plekkraam (joon. 8-14). Nõrga magnetvälja puhul ei avalda selline konstruktsioon mingit mõju tühijooksukõvera kujule. Tugeva magnetvälja puhul küllastub raami väike ristlõige, mistõttu tühijooksukõvera algosa kõverdub (joon. 8-15).

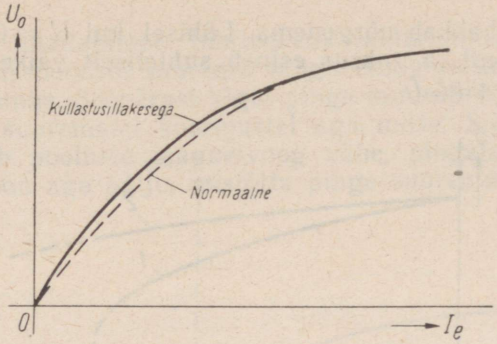


Joon. 8-14. Küllastussillake pooluse südamikus

Järgnevalt tutvume haruvoolugeneraatori karakteristikutega.

Tühijooksukarakteristik võetakse üles samuti kui võõrergutusega generaatoril. Tühijooksul on haruvoolugeneraatori ankru mähises vool $I_a = I_e$, mis põhjustab pingelangu ankrus ja ankrureaktsiooni. Ergutusvool on enamasti 1 ... 3% ankru nimivoolust. Seepärast võib ilma suurema veata tühijooksukarakteristiku üles võtta endaergutamise lülituses, ainult ühesuunalise ergutusvooluga (joon. 8-16).

Väliskarakteristik saadakse katselisel teel, kui $n = \text{const}$ ja $r_e = \text{const}$. Haruvoolugeneraatori pingemuutus ΔU on suurem kui võõrergutusega generaatoril. Selle põhjuseks on asjaolu, et ergutusvool nõrgeneb haruvoolugeneraatoris võrdeliselt masina klemmipingega U, sest

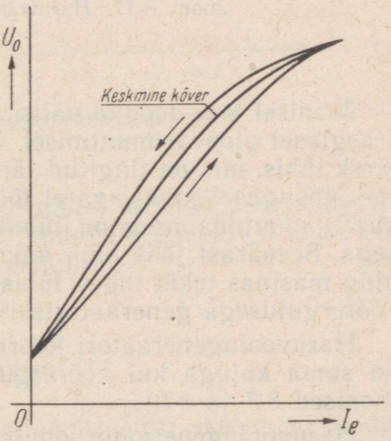


Joon. 8-15. Tühijooksukõver küllastussillakese puhul

$$I_e = \frac{U}{r_e}, \tag{8-11}$$

kus $r_e = \text{const}$. Võõrergutusega generaatoris on $I_e = \text{const}$.

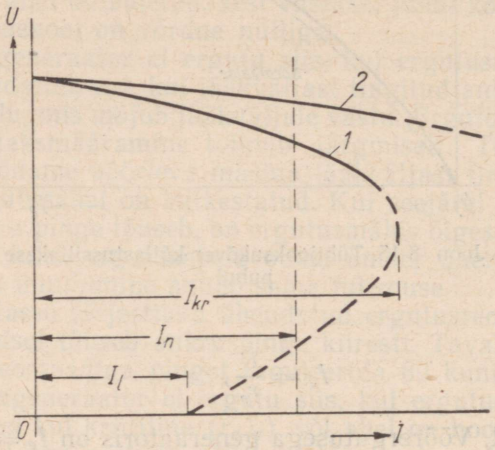
Järelikult on haruvoolugeneraatori pingemuutus tingitud pingelangust ankrus, ankrureaktsioonist ja ergutusvoolu nõrgenemisest generaatori klemmipinge muutumise tõttu. Vastav väliskarakteristik on näidatud joonisel 8-17 (kõver *1*). Samas on võrdluseks toodud võõrergutusega generaatori väliskarakteristik (kõver *2*). Võõrergutusgeneraatori koormusvool pidevalt tugevneb ning lühisel (kui $U = 0$) omandab väga suure väärtuse, mis võib põhjustada kommutaatoril ringtule tekkimise.



Joon. 8-16. Haruvoolugeneraatori tühijooksukarakteristik

Haruvoolugeneraatori koormusvool aga tugevneb ainult teatud piirini, s. o. kriitilise koormusvoolu väärtuseni I_{kr} (kõver *1*). Viimane on tavaliselt 2 . . . 2,5 korda suurem nimivoolust. Edasisel pingelangu suurenemisel koormus väheneb. See on tingitud sellest, et koormusvoolu suurus sõltub ahela takistusest. Mida väiksem on ahela takistus, seda suurem on koormusvool. Kuna aga haruvoolugeneraatori klemmipinge kiiresti langeb, siis vähematel koormustel koormusvool esialgu tugevneb, sest generaatori pinge siis muutub vähe. Suureneva koormuse puhul aga väheneb ahela takistus, generaatori pinge langeb ikka enam ja koormusvool, saavutades kriiti-

lise väärtuse, hakkab nõrgenema. Lühisel, kui $U = 0$, on ergutusvool samuti null ja ankrus esineb suhteliselt väike jääkmagnetvoost tingitud vool I_l.



Joon. 8-17. Haruvoolugeneraatori väliskarakteristik

Joonisel 8-17 toodud väliskarakteristik saadakse koormusvoolu I aeglasel pideval muutmisel. Ekspluatatsioonis võib tihti tekkida järsk lühis, mis on tingitud järsust olukorra muutusest generaatoris. Niisugusel juhul aga ei jõua masina magnetvoog inertsi tõttu kiirelt muutuda ning on lühise esimestel hetkedel endise suurusega. Seepärast jääb emj. ankru mähises samuti esialgu endiseks ning masinas tekib tugev lühisvool, mis on ohtlik masinale (nagu võõrergutusega generaatoriski).

Haruvoolugeneraatori koormus- ja reguleerimiskarakteristikud on sama kujuga kui võõrergutusega generaatoril (vt. vastavalt joonised 8-7 ja 8-9).

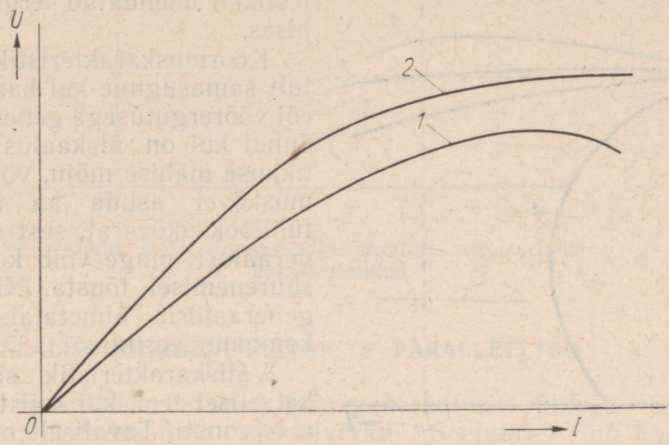
Haruvoolugeneraator on levinumaid alalisvoolugeneraatorite tüüpe, sest ta pinge muutub nimikoormuse piirides suhteliselt vähe ning ta ei vaja eraldi ergutusvoolu allikat.

8-5. PEAVOOLUGENERAATOR

Peavoolugeneraatori (vt. joon. 8-4) ergutusvooluks on koormusvool. Järelikult saab tühijooksu- ning koormuskarakteristikuid üles võtta katselisel teel ainult võõrergutuse kasutamisel.

Generaatori väliskarakteristik on toodud joonisel 8-18 (kõver *1*). Kuna ankrus esineb pingelang ja ankrureaktsioon, siis väliskarak-

teristik asub madalamal tühijooksukarakteristikust (kõver *2*). Koormuse suurenemisel suureneb magnetvoog ja ka magnetahela küllastus masinas. Seepärast algul pinge muutub võrdeliselt koormusvooluga, suurematel koormustel aga mitte. Suure küllastuse puhul muutub pooluste magnetvoog vähe, pingelang ankrus ja ankrureaktsioon aga palju, mistõttu pinge suurematel koormustel



Joon. 8-18. Peavoolugeneraatori väliskarakteristik

hakkab langema (joon. 8-18). Nagu näha, muutub peavoolugeneraatori pinge koormuse muutumisel tunduvalt. Seepärast leiab peavoolugeneraator kasutamist ainult erijuhtudel.

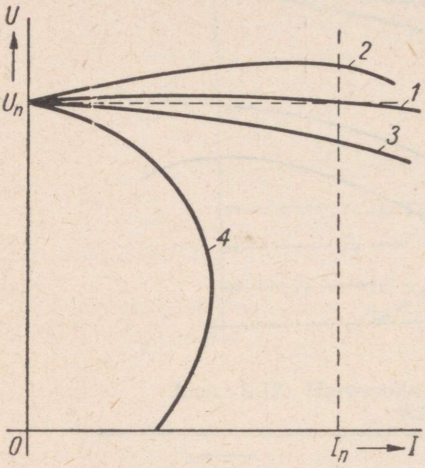
8-6. SEGAERGUTUSEGA GENERAATOR

Segaergutusega ehk kompaundgeneraatori skeem on toodud joonisel 8-5. Segaergutusega generaatoris, millel on nii paralleelselt kui ka järjestikku ühendatud ergutusmähised, kasutatakse ära haruvoolu- ja peavoolugeneraatorite omadusi. Segaergutusega generaatori haruvoolu-ergutusmähisega peab generaatori tühijooksul saama nimipinge. Järjestikku ühendatud ergutusmähis arvutatakse tavaliselt nii, et tema magneetimisergutusest jätkuks ankrureaktsiooni ja ankru pingelangu kompenseerimiseks nimikoormusel. Järjestikku ühendatud ergutusmähise puhul mõjub tema magneetimisergutus samas suunas paralleelselt ühendatud ergutusmähise magneetimisergutusega. Niisugust ühendusviisi nimetatakse pärikompaundühenduseks. Erijuhtudel kasutatakse ka vastukompaundühendust, kus järjestikku ühendatud ergutusmähise mag-

neetimisergutus on vastassuunaline paralleelse ergutusmähise magneetimisergutusega.

Selgitame segaergutuse generaatori omadusi tema karakteristikute abil.

Segaergutusega generaatori tühijooksukarakteristik on samasugune kui haruvoolugeneraatoril, sest tühijooksul puudub koormusvool ja seega ka vool järjestikku ühendatud ergutusmähises.



Joon. 8-19. Kompaundgeneraatori väliskarakteristikud

Koormuskarakteristik on kujult samasugune kui haruvoolu- või võõrergutusega generaatoril. Juhul kui on ülekaalus järjestikkuse mähise mõju, võib koormuskõver asuda ka ülalpool tühijooksukõverat, sest siis generaatori pinge võib koormuse suurenemisel tõusta. Niisugust generaatorit nimetatakse ülekompaundeerituks.

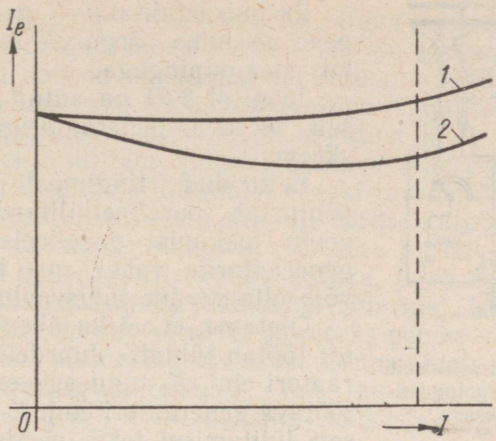
Väliskarakteristik saadakse katselisel teel, kui $n = \text{const}$ ja $r_e = \text{const}$. Tavaliselt on kasutusel pärikompaundühendus, kusjuures järjestikune ergutusmähis on selline, et tema magneetimisergutus kompenseerib ankru pingelangu ja ankrureaktsiooni, ning generaatori klemmipinge U nimikoormusel on võrdne pingega tühijooksul (kõver *1* joonisel 8-19).

Kui suurendada järjestikuse ergutusmähise keerdude arvu ja seega ka selle mähise magneetimisergutust, siis koormuse suurenemisel klemmipinge tõuseb (kõver *2*). Sellist väliskarakteristikut on tarvis näiteks juhul, kui on vaja saada konstantset pinget tarbija klemmidel. Pingelangu liinis kompenseerib siis kõrgem pinge generaatori klemmidel.

Vastukompaundühenduse puhul omandab väliskarakteristik järsult langeva iseloomu (kõver *4*). Niisugust karakteristikut vajatakse näiteks keevitusgeneraatorite puhul. Joonisel 8-19 on antud võrdluseks ka haruvoolugeneraatori väliskarakteristik (kõver *3*).

Pärikompaundgeneraatori reguleerimiskarakteristikud on näidatud joonisel 8-20, kus kõver *1* vastab normaalsele pärikompaundgeneraatorile, kõver *2* — ülekompaundeeritule.

Kompaundgeneraator päriühenduses on heade omadustega, sest ta hoiab automaatselt generaatori klemmidel peaaegu konstantse pinge. Seepärast on tänapäeval paljudel haruvoolugeneraatoritel järjestikune ergutusmähis.



Joon. 8-20. Kompaundgeneraatori reguleerimiskarakteristikud

8-7. ALALISVOOLUGENERAATORITE PARALLEELTÖÖ

Elektrijaamades katavad mitu generaatorit ühiselt tarbijate koormust, töötades ühte elektrivõrku. Seejuures võib ühendada generaatorid:

1) järjestikku, s. o. ühe generaatori plussklemm ühendatakse teise generaatori miinusklemmiga;

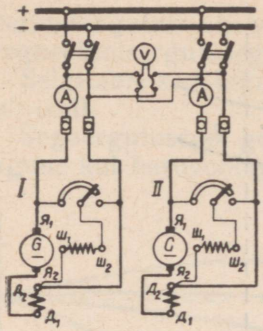
2) paralleelselt, s. o. generaatorite plussklemmid omavahel ja samuti miinusklemmid omavahel.

Generaatorite järjestikühendust kasutatakse harva, sest sellise ühendusviisi olulisemaks puuduseks on elektrienergia saamise katkemine juhul, kui üks järjestikku ühendatud generaatoritest vigastuse tõttu välja langeb. Järjestikühendust kasutatakse vahel siis, kui soovitakse saada kõrgemat pinget. Kui lülitada kaks generaatorit järjestikku ja tuua kahe generaatori ühenduskohast välja nn. nulljuhe, saadakse kolmejuhtmeline alalisvoolusüsteem.

Enamasti töötavad generaatorid paralleelselt. Sellise ühendusviisi eeliseks on asjaolu, et iga paralleelselt töötavat generaatorit võib igal ajal sisse või välja lülitada teisi töötavaid generaatoreid häirimata. Allpool selgitame haruvoolu- ja kompaundgeneraatorite paralleeltööd.

Haruvoolugeneraatorite lülitamiseks paralleeltööle tuleb täita järgmised tingimused:

1) juurdelülitatava generaatori polaarsus peab vastama võrgu või töötava generaatori omale, s. o. juurdelülitatava generaatori plussklemm tuleb ühendada töötava generaatori plussklemmiga ja vastavalt ka miinusklemmid omavahel;



Joon. 8-21. Paralleelselt töötavate haruvoolugeneraatorite skeem

2) juurdelülitatava generaatori emj. peab võrduma võrgu või töötava generaatori klemmipingega.

Joonisel 8-21 on antud kahe paralleelselt töötava generaatoriga elektrijaama skeem.

Eeltoodud tingimuste mittetäitmine põhjustab paralleellülitamisel ühtlustusvoolu tekkimist paralleelselt ühendatud generaatorite vahel, mis halvemal juhul võib olla võrdne lühisvooluga.

Oletame, et võrku ühendatud generaator töötab tühjalt. Juurdelülitatava generaatori emj. E_1 olgu aga suurem kui juba töötava generaatori emj. E_2. Siis paralleelselt lülitamisel tekib nende generaatorite vahel ühtlustusvool, mille suurus

$$I_{ü} = \frac{E_1 - E_2}{2r_a}, \tag{8-12}$$

kus r_a — ühe generaatori ankrutakistus, kui mõlema generaatori takistused on ühesuurused.

Kuna ankrutakistus r_a on alati suhteliselt väike (enamasti alla 1 oomi), siis tekkiv ühtlustusvool võib osutuda küllalt suureks. Kui generaatorite polaarsus ei ole vastav (s. o. ühe generaatori plussklemm on ühendatud teise generaatori miinusklemmiga ja vastupidi), siis liituvad paralleelselt lülitatud generaatorite elektromotoorsed jõud ning tekib ühtlustusvool

$$I_{ü} = \frac{E_1 + E_2}{2r_a} = \frac{2E_1}{2r_a} = \frac{E_1}{r_a}. \tag{8-13}$$

Seejuures on eeldatud, et $E_1 = E_2$. Tekkiv ühtlustusvool on võrdne generaatori lühisvooluga, mis on muidugi lubamatu. Seepärast on vajalik enne paralleellülitamist eeltoodud nõuded täita.

Õige polaarsuse määramine on võimalik kas polaarsust omava mõõteriistaga (näit. magnetelektriline voltmeeter) või avatud lüliti klemmidevahelise pinge mõõtmise teel. Esimesel juhul mõõdame näiteks magnetelektrilise voltmeetriga pinget juurdelülitatava generaatori avatud lüliti klemmidel nii võrgu kui ka generaatori poolt. Õige polaarsuse korral peavad vastasasuvad ja sisselülitamisel kokkuühendatavad lüliti klemmid omama sama polaarsuse. Kui ei omata polaarset mõõteriista, võib polaarsust määrata ka teisiti. Selleks ühendatakse juurdelülitatava generaatori avatud lüliti vastasasuvatest klemmidest üks paar ajutiselt omavahel kokku. Teiste lüliti klemmide vahele ühendatakse voltmeeter. Kui juurdelülitatav generaator II ei ole ergutatud, siis näitab

voltmeeter võrgupinget. Kui juurdelülitatava generaatori ergutamisel voltmeetri pinge hakkab tõusma, siis on generaatorite polaarsus vale, sest nad on ühendatud järjestikku. Kui aga voltmeetri pinge hakkab langema, on polaarsus õige. Viimasel juhul suurendame juurdelülitatava generaatori ergutust kuni voltmeetri näit muutub nulliks ja lülitame juurdelülitatava generaatori lüliti sisse.

Pärast paralleeltööle lülitamist ei teki juurdelülitatud generaatoris koormusvoolu, sest tema emj. oli võrdsustatud võrgupingega. Et juurdeühendatud generaatorit koormata ja koormust paralleelselt töötavate generaatorite vahel jaotada, tuleb suurendada seda generaatorit liikumapaneva jõumasina võimsust. Paralleelselt töötava generaatori koormuse vähendamiseks peame vähendama vastava generaatori jõumasina võimsust. Jõumasinate võimsust reguleeritakse kiirusregulaatoritega, mis muudavad jõumasinasse antava kütuse (auru, vee, õli, bensiini) hulka ja seega ka jõumasina poolt arendatavat mehaanilist võimsust.

Paralleelselt töötavate generaatorite voolud on avaldatavad järgmiselt:

$$I_I = \frac{E_I - U}{R_1}, \qquad I_{II} = \frac{E_{II} - U}{R_2}, \tag{8-14}$$

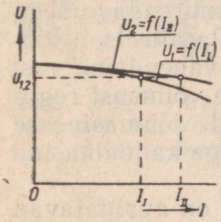
kus I_I, I_{II} — paralleelselt töötavate generaatorite koormusvoolud,
E_I, E_{II} — vastavate generaatorite elektromotoorsed jõud,
R_1, R_2 — vastavate generaatorite sisetakistused,
U — võrgupinge või generaatorite ühine klemmipinge.

Kui suurendame generaatori I jõumasina mehaanilist võimsust kiirusregulaatori abil, suureneb selle generaatori ankru pöörlemiskiirus ja seega ka emj. E_1. Sellest tingituna suureneb aga ka koormusvool I_I, kui võrgupinge U ei muutu. Kui võrk, millega paralleelselt töötab generaator, on küllalt võimas, siis on viimane tingimus täidetud. Generaatori koormus suureneb tema poolt võrku antava elektrilise võimsuse tõttu, mis tasakaalustub jõumasina poolt arendatava mehaanilise võimsusega. Muutumata tarbijate koormuse puhul väheneb seetõttu teise generaatori koormus, nii et tema koormusvool on nüüd $I_{II} - I_I$. Seega selle generaatori kohta kehtib võrdus

$$U = E_{II} - (I_{II} - I_1)R_2 = E_{II} - I_{II}R_2 + I_1R_2. \tag{8-15}$$

Sellest seosest järeldub, et võrgupinge peab generaatori juurdelülitamisel tõusma, sest seni töötanud generaatori emj. E_{II} ei ole muutunud. Et võrgupinge U endist suurust taastada, peame vähendama seni töötanud generaatori jõumasina mehaanilist võimsust tema kiirusregulaatori abil. Siis väheneb selle generaatori pöörlemiskiirus ja seega ka tema emj. E_{II} ning koormusvool I_{II}, mis tingib võrgupinge U langemise. Nii saab kahe või mitme paralleelselt

töötava generaatori koormust soovi kohaselt jaotada, säilitades võrgupinge U muutumatuna. Ühe generaatori koormuse vähenemisel võib aga selle emj. muutuda võrgu pingest madalamaks. Siis tekib selles generaatoris endisele vastusuunaline vool ja ta muutub mootoriks. Selline olukord on lubamatu, sest ta võib põhjustada tõsise avarii. Seepärast varustatakse paralleelselt töötavad generaatorid minimaal- ja vastuvoolu-kaitseautomaatidega, mis lahutavad niisugusel juhul generaatori võrgust.



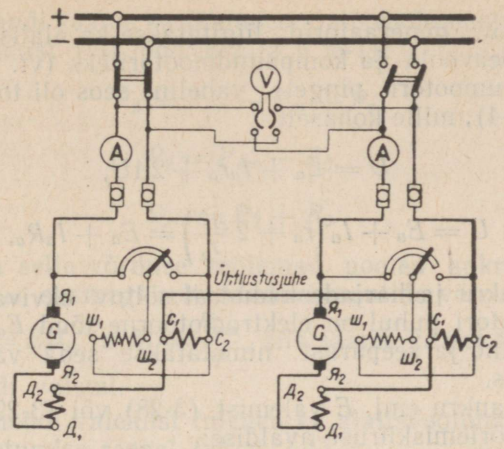
Joon. 8-22. Koormusvoolude jaotus paralleelselt töötavate generaatorite vahel

Paralleelselt töötavate generaatorite koormuse jagunemine sõltub veel nende generaatorite väliskarakteristikute ja jõumasinate kiirusekarakteristikute ühtimisest. Tõepoolest, kui kahe sama võimsusega paralleelselt töötava generaatori väliskarakteristikud ei ühti (joon. 8-22), siis ei jagune ka koormus nende generaatorite vahel võrdeliselt. Generaator, mille väliskarakteristik on suurema languga, võtab peale suhteliselt nõrgema koormusvoolu kui generaator, mille väliskarakteristik on väiksema languga (joonisel 8-22 $I_{II} > I_I$). Seepärast peavad paralleelselt töötavate generaatorite väliskarakteristikud kui ka jõumasinate kiiruskarakteristikud ühtima, kui ei kasutata pinge automaatset reguleerimist.

Paralleelselt töötavate alalisvoolugeneraatorite koormuse jaotust saab teostada aga ka teisiti, nimelt ergutusvoolu muutmise teel. Suurendades ühe paralleelselt töötava generaatori ergutusvoolu, suureneb tema emj. ja ka koormusvool. Suurenenud koormuse tõttu generaatorit liikuma panev jõumasin pidurdub. Sellest tingituna hakkab tööle jõumasina kiirusregulaator, mis suurendab jõumasinasse antava kütuse hulka ja seega ka jõumasina mehaanilist võimsust seni, kuni saabub tasakaal generaatori suurenenud elektrilise koormuse ja jõumasina mehaanilise võimsuse vahel. Et võrgupinge säilitaks endise väärtuse, peame teise generaatori ergutust vastavalt vähendama.

Kompaundgeneraatorite paralleeltöö kohta kehtivad ülalnimetatud nõuded, kuid stabiilse töötamise tagamiseks peavad peavooluergutusmähised olema ühendatud omavahel ühtlustusjuhtmega (joon. 8-23).

Ühtlustusjuhtme vajadus on tingitud kompaundgeneraatori omadustest. Teatavasti koormuse suurenemisel suureneb kompaundgeneraatori emj. peavoolu-ergutusmähise voolu tugevnemise tõttu. Seetõttu paralleeltööl põhjustab koormuse suurenemine generaatori emj. suurenemise, mis omakorda põhjustab koormuse suurenemise. Nii võtab iga juhusliku koormuse suurenemise tagajärjel üks generaator üle kogu koormuse, kuna teise või teiste generaatorite koormus väheneb. Paralleeltöö on sellistes tingimustes



Joon. 8-23. Paralleelselt töötavate kompaundgeneraatorite skeem

ebastabiilne. Kui aga ühendada paralleelselt töötavate kompaundgeneraatorite peavoolumähised omavahel ühtlustusjuhtmetega, osutuvad need mähised üksteisega paralleelselt ühendatuks ning iga koormusvoolu ja seega ka peavoolumähise ergutusvoolu muutus ühes generaatoris põhjustab voolu muutumise ka ülejäänud generaatorite peavooluergutusmähistes. Seega aga suurenevad kõikide generaatorite koormusvoolud ja generaatorite paralleeltöö muutub täiesti stabiilseks.

Kompaundgeneraatorite koormuse jaotus ja üleviimine ühelt generaatorilt teisele toimub samal viisil kui haruvoolugeneraatorite puhul, s. o. kas jõumasina kiirusregulaatori või generaatori ergutusvoolu muutmise teel.

IX PEATÜKK

ALALISVOOLUMASIN MOOTORINA

9-1. ALALISVOOLUMOOTORI ISELOOMUSTUS

Alalisvoolumasina töötamispõhimõtete selgitamisel ilmnes, et sama alalisvoolumasin võib töötada nii generaatorina kui ka mootorina (p. 1-1). Esimesel juhul pannakse ankur pöörlema mingi mehaanilise jõuallika (jõumasina) abil ja saadakse ankrust elektrienergiat. Teisel juhul tuleb toita ankrut mingist alalisvoolu allikast (-generaatorist), mille tulemusel ankur hakkab pöörlema ja annab võllil mehaanilist energiat. Sellele põhimõttele juhtis tähelepanu juba 1834. a. vene akadeemik E. Lenz.

Samuti kui generaatorid liigitatakse ka alalisvoolumootorid haruvoolu-, peavoolu- ja kompaundmootoriteks (vt. p. 8-2).

Alalisvoolumootori pingete vaheline seos oli toodud punktis 6-1 (valem 6-4), mille kohaselt:

$$U = E_a + I_a r_a + 2\Delta U,$$

$$\text{ehk } U = E_a + I_a\left(r_a + 2\frac{\Delta U}{I_a}\right) = E_a + I_a R_a, \tag{9-1}$$

kus R_a on ankru ja harjade kadudest sõltuv ekvivalentne ankru takistus. Mootori puhul on elektromotoorne jõud E_a ankruvoolule vastassuunaline ja seepärast nimetatakse seda vastuelektromotoorseks jõuks.

Lähtudes ankru emj. E valemist (3-28) või (3-29), leiame sellest ankru pöörlemiskiiruse avaldise:

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{E_a}{\frac{p}{60}\cdot\frac{N}{a}\Phi}. \tag{9-2}$$

Kui asendada siin E_a tema avaldisega valemist (9-1), saame lõplikult

$$n = \frac{U - I_a R_a}{\frac{p}{60}\cdot\frac{N}{a}\Phi}. \tag{9-3}$$

Olenevalt alalisvoolumootori ergutusmähise ühendusviisist ning koormuse muutumise iseloomust muutub vastavalt ka ankru pöörlemiskiirus n.

Mootoris toimuva elektrilise energia mehaaniliseks energiaks muundumise tulemusel tekib mootori ankru võllil pöördemoment, mille avaldis on tuletatud punktis 8-1:

$$M = \frac{p}{2\pi}\cdot\frac{N}{a}\Phi I_a = C_M \Phi I_a.$$

Mootori ankru võllil arendatav pöördemoment peab konstantse pöörlemiskiiruse n korral ületama esmajoones mootori poolt liikumapandava töömasina võlli pidurdava (koormus-) momendi M_2. Peale selle aga tuleb veel ületada pidurdav tühijooksumoment M_0.

Seega võime kirjutada elektrimootorist ja töömasinast koosneva masin-agregaadi momentide tasakaaluvõrrandi

$$M = -(M_2 + M_0). \tag{9-4}$$

Kui aga kõnelda nagu tavaliselt eelnimetatud pidurdavate momentide ületamiseks vajaliku mootori pöördemomendi komponentidest, siis tuleb elektrimootori momentide võrrand kirjutada järgmiselt:

$$M = M_2 + M_0. \tag{9-5}$$

Sama võrrandi saame ka lähtudes alalisvoolumootori energeetilisest diagrammist (vt. joon. 6-2 ja p. 6-1):

$$P_2 = P_{em} - P_m - P_r$$

ehk

$$P_2 = P_{em} - P_0,$$

millest

$$P_{em} = P_2 + P_0.$$

Kui jagada selle võrduse mõlemad pooled ankru pöörlemise nurkkiirusega ω, saamegi eeltoodud momentide võrrandi (9-5).

Kuna $P_{em} = E_a I_a$ ja $M = \frac{P_{em}}{\omega}$, siis saame ka sel teel eeltoodud pöördemomendi valemi.

Pöördemomendi valemist tuleneb ka alalisvoolumootori pöörlemissuuna muutumise reegel (vt. p. 1-1).

Et muuta pöörlemissuunda, peab muutma pöördemomendi märki. Selleks tuleb muuta kas magnetvoo polaarsust ergutusvoolu suuna muutmise teel, või ankruvoolu suunda (mitte aga mõlemaid korraga).

Kui pöörlemiskiirus ei ole püsiv (näiteks käivitamisel, pöörlemiskiiruse muutmisel), tuleb juurde veel nn. dünaamiline moment M_J, mis on tingitud kõikide ankruga ühenduses olevate pöörlevate masside inertsmomendist J. Seega muutuva pöörlemiskiiruse puhul on momentide võrrand järgmine:

$$M = M_2 + M_0 + M_J. \tag{9-6}$$

Dünaamiline moment

$$M_J = J\frac{d\omega}{dt}, \tag{9-7}$$

kui $J = \text{const}$ (tavaliselt on see alati nii).

Dünaamiline moment esineb ainult siis, kui mootori pöörlemiskiirus muutub, kuna aga teised võrrandi 9-6 paremal pool olevad momendid esinevad alati. Seepärast nimetatakse summat $M_2 + M_0$ staatiliseks momendiks:

$$M_{st} = M_2 + M_0.$$

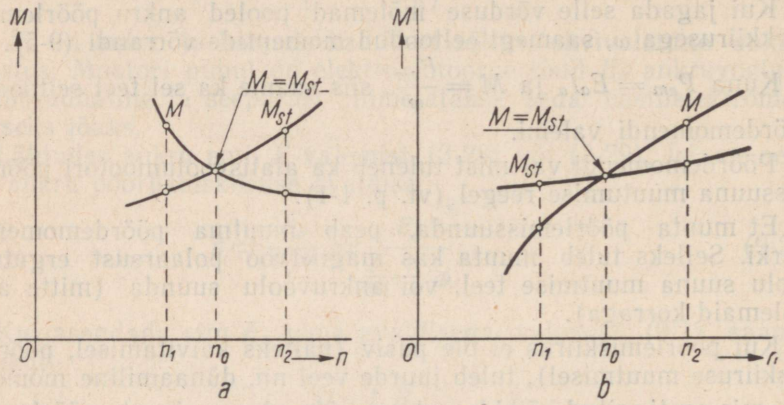
Seega on momentide võrrand lõplikul kujul järgmine:

$$M = M_{st} + M_J. \tag{9-8}$$

Enamasti on $M_2 \gg M_0$. Seega võib staatiliseks momendiks lugeda töömasina pidurdusmomenti. Staatilise momendi muutumise iseloom sõltub töömasina omadustest ja tootmisprotsessi iseloomust. Et oleks võimalik elektriajami (elektrimootori) ja tema

poolt liikuma pandava töömasina stabiilne töötamine püsival kiirusel, peavad mootori pöördemomendi ja töömasina pidurdusmomendi muutumise iseloom olema üksteisega kooskõlas.

Konstantsel pöörlemiskiirusel on elektriajami momentide võrrand $M = M_{st}$, kuna $M_J = 0$. Kuid see tingimus ei taga veel stabiilset töötamist. Joonisel 9-1 on antud mootori pöördemomendi M ja töömasina staatilise momendi M_{st} sõltuvused pöörlemiskiirusest n.



Joon. 9-1. Elektrimootori stabiilse töötamise tingimused:
a — stabiilne töötamine; *b* — ebastabiilne töötamine

Kui nimetatud kõverate vastastikune asend on selline nagu joonisel 9-1, *a*, siis iga juhusliku pöörlemiskiiruse muutumise (suurenemise või vähenemise) tõttu saab mootor sellise suunaga kiirenduse, mis sunnib teda tagasi pöörduma endisele algkiirusele (n_0). Tõepoolest, kui pöörlemiskiirus väheneb väärtuseni n_1, väheneb staatiline moment M_{st} ja suureneb pöördemoment M, mistõttu mootori pöörlemiskiirus uuesti suureneb kuni tasakaalupunktini n_0. Suureneb pöörlemiskiirus väärtuseni n_2, siis osutub $M_{st} > M$ ning mootor pidurdub kuni kiiruseni n_0. Seega selliste karakteristikute puhul on töötamine stabiilne.

Vastupidine on olukord aga siis, kui kõverad lõikuvad selliselt nagu joonisel 11-1, *b*, sest siis iga pöörlemiskiiruse muutumine põhjustab pöörlemiskiiruse pideva muutumise kas seismajäämise või väga suurte pöörlemiskiiruste suunas. Seega niisugusel juhul on stabiilne töötamine võimatu.

Matemaatiliselt on stabiilse töötamise tingimus avaldatav järgmiselt:

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{st}}{dn}, \qquad (9\text{-}9)$$

kuna ebastabiilne olukord on siis, kui

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_{st}}{dn}. \qquad (9\text{-}10)$$

Alalisvoolumootorite omadusi iseloomustavad karakteristikud. Need on kõverad, mis näitavad graafiliselt mitmesuguste mootorit iseloomustavate suuruste omavahelist sõltuvust. Neist tähtsamaiks on käivitus-, töötamis- ja reguleerimiskarakteristikud.

Käivituskarakteristikud kujutavad käivitusvoolu, käivitusmomendi ja pöörlemiskiiruse muutumist käivitamisel.

Töötamiskarakteristikud annavad ettekujutuse mootori käitumisest püsiva töötamise puhul. Siia kuuluvad pöörlemiskiiruse, pöördemomendi, ankruvoolu ja kasuteguri sõltuvus kasulikust võimsusest, kui võrgupinge on muutumatu. Samuti on töötamiskarakteristikuks pöörlemiskiiruse sõltuvus pöördemomendist. Viimane kannab *mehaanilise karakteristiku* nimetust ja omab suurt tähtsust elektriajamite tööprotsesside selgitamisel.

Reguleerimiskarakteristik iseloomustab mootorit pöörlemiskiiruse reguleerimisel. Nagu allpool näeme, on alalisvoolumootori pöörlemiskiirust võimalik suurtes piirides ja sujuvalt reguleerida, mistõttu alalisvoolumootoreid kasutatakse laialt seal, kus on vajalik pöörlemiskiiruse ulatuslik reguleerimine.

Järgnevalt tutvume üksikute alalisvoolumootorite liikide ja nende omadustega.

9-2. HARUVOOLUMOOTOR

Haruvoolumootor lülitatakse võrku nii, et tema ergutusmähis on ankru mähisega ühendatud paralleelselt (joon. 9-2). Ankru ahelasse on lülitatud käivitusreostaat, mille ülesandeks on vähendada käivitamise alghetkel tekkivat tugevat voolu.

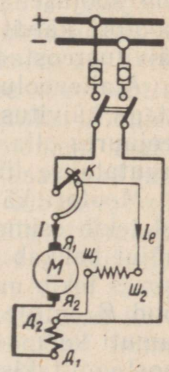
Käivitamise esimesel hetkel, s. o. võrgulüliti sulgemisel, on mootori ankur liikumatu ja emj. E_a null. Seega tekib sisselülitamisel ankrus vool

$$I_a = \frac{U}{R_a}. \qquad (9\text{-}11)$$

Kuna ankru ahela takistus R_a on tavaliselt väga väike, siis on tekkiv vool tugev, ulatudes 10 ... 30-kordse ankru nimivoolu väärtuseni. Selline suur käivitusvoolu tõuge põhjustab:

1) tugeva sädelemise kommutaatori harjade all, mis võib isegi areneda ringtuleks;

2) ankru mähise kuumenemist;



Joon. 9-2. Haruvoolumootori lülitusskeem

3) suurt pingelangu mootorit toitvas võrgus;
4) suurt, löögitaolist momenti võllil, mis võib mehaaniliselt vigastada töömasinat.

Niisugune vool tekib siis, kui ankru ahelas puudub käivitusreostaat.

Seepärast kasutatakse alalisvoolumootorite käivitamisel alati *käivitusreostaati*. Erandi moodustavad väga väikese võimsusega mootorid (mõnisada vatti). Käivitusreostaadi takistus valitakse selline, et käivitusvool oleks lubatavates piirides [kuni (1,5 ... 1,75)I_n]. Kui käivitusreostaadi takistus on r_k oomi, siis on vool sisselülitamisel

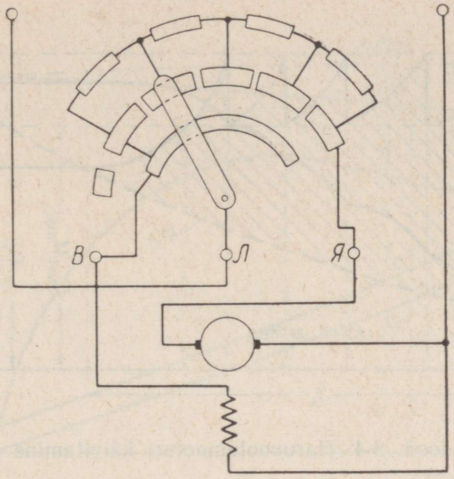
$$I_{ak} = \frac{U}{R_a + r_k}. \qquad (9\text{-}12)$$

Käivitamise alghetke voolule I_{ak} vastab käivitusmoment $M_k = C_M \Phi I_{ak}$. Kui see moment on suurem kui staatiline moment M_{st}, siis hakkab mootor pöörlema teatud kiirendusega ja tema ankrus tekib pöörlemiskiirusele võrdeline vastuelektromotoorne jõud (vt. valem 9-2).

Kui ergutusmähise mõlemad otsad oleksid vahetult ühendatud ankru mähisega, oleks käivitamise ajal tema klemmidel pinge käivitusreostaadis tekkiva pingelangu võrra võrgupingest madalam. Seetõttu aga ergutusvool, peamagnetvoog ja pöördemoment vähenevad ja mootor võib mitte käivituda, kuna aga tema vool tugevneb. Järelikult peab ergutusmähis olema nii ühendatud, et sisselülitatud käiviti puhul oleks ta alaliselt täie võrgupinge all. Väljalülitatud käiviti puhul aga peab ergutusmähis olema võrgust eraldatud ja lühistatud läbi ankru mähise ja käiviti. See on vajalik ergutusahela katkestamise vältimiseks, mispuhul ergutusahelas tekiks suure induktiivsuse tõttu ohtlik liigpinge. Nüüd aga voolu katkemisel ergutusmähises salvestatud magnetiline energia eraldub soojusena käivitusreostaadis ja ankru mähises. Haruvoolumootori käivitamiseks kasutatava ja eeltoodud nõuetele vastava käivitusreostaadi skeem on näha joonisel 9-3.

Alalisvoolumootorite käivitamiseks kasutatakse metalltakistitega käivitusreostaate õhk- või õlijahutusega. Reostaadid võivad seejuures olla käsitsi või automaatselt juhitavad. Käivitusreostaat arvutatakse lühiajaliseks töötamiseks.

Mootori käivitamisprotsess kulgeb järgmiselt. Võrku lülitamisel tekib esimesel hetkel vool I_{ak} (valem 9-12). Käivitusmomendi mõjul hakkab mootor järjest suureneva kiirusega pöörlema. Seejuures tekib ankrus samuti järjest suurenev vastuelektromotoorne jõud E_a, mille tõttu esialgne vool hakkab nõrgenema (väheneb samuti ka mootori pöördemoment). Nüüd vähendatakse käivitusreostaadi takistust ühe takistusastme võrra, pöörates kontakthooba järgmisele kontaktile. Ankru ahela takistuse vähenemise tõttu tugevneb jällegi järsult vool ankru ahelas. Tugevama voolu tõttu kasvab pöördemoment, ankur saab kiirenduse, pöörlemiskiirus

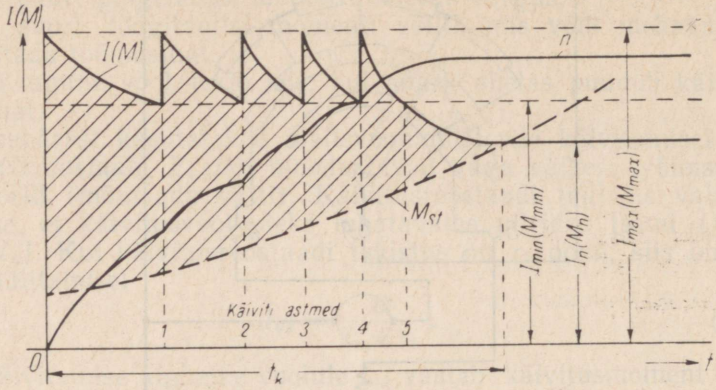


Joon. 9-3. Haruvoolumootori käivitusreostaadi skeem

suureneb veelgi, emj. ankrus kasvab ja vool nõrgeneb uuesti. Edasi toimub kõik analoogiliselt eelmisele, kuni kogu reostaadi takistus on ankru ahelast välja lülitatud ning mootor on saavutanud normaalse pöörlemiskiiruse n ja ankruvoolu I_a. Käivitamisel toimuvad ankruvoolu ja pöörlemiskiiruse ajalised muutumised on näidatud joonisel 9-4. Käivitusprotsessi lõpul on ankruvool:

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}. \tag{9-13}$$

Haruvoolumootori käivitamisel on ergutusvool ja seega ka magnetvoog konstantsed, kui ei võeta arvesse ankrureaktsiooni mõju. Mootori pöördemomendi võib lugeda võrdeliseks ankruvooluga. Nii on joonisel 9-4 näidatud voolu muutumise kõver ühtlasi ka vastavas mõõtkavas momendi muutumise kõveraks. Jooniselt selgub, et käivitamisel muutub nii vool kui ka moment maksimaalse ja minimaalse väärtuste vahel. Käiviti takistusastmed tuleb arvutada nii, et voolu maksimaalväärtus ei ületaks lubatavat piiri ning momendi minimaalne väärtus ei langeks alla töömasina pidurdusmomendi (staatilise momendi). Joonisel 9-4 on kriipsjoonega näidatud staatilise momendi kõver. Elektrimootori ja sellega ühendatud töömasina kiiruse tõstmiseks nimikiiruseni peab käivitamisel tekkima momendi ülejääk $M - M_{st}$, mille mõjul toimub agregaadi kiirendamine (joonisel 9-4 viirutatud pind). Pöördemomendi M ja staatilise momendi M_{st} kõverate lõikepunktis käivitamisprotsessi lõpul saabub stabiilne, konstantse pöörlemiskiirusega olukord. Juhul kui pöördemoment langeb alla staatilise momendi



Joon. 9-4. Haruvoolumootori käivitamine

enne käivitamisprotsessi lõppu ei toimu mootori ülesjooksu nimikiiruseni ja mootor jääb pöörlema madalamal pöörlemiskiirusel.

Haruvoolumootori töötamist püsival koormusel iseloomustavad töötamiskarakteristikud, mis on toodud joonisel 9-5.

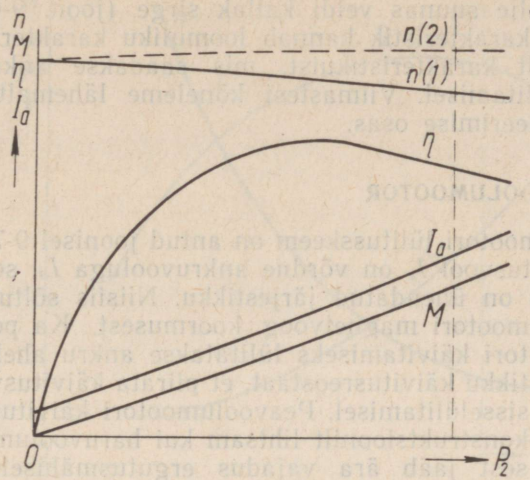
Pöörlemiskiiruse karakteristik $n = f(P_2)$ saadakse, kui võrgupinge $U = U_n = \text{const}$ ja ergutusvool $I_e = \text{const}$. Neil tingimusil on ka mootori peamagnetvoog $\Phi = \text{const}$ ja seega pöörlemiskiirus sõltub vaid pingelangust I_aR_a ankrus (vt. valem 9-3) ning ankrureaktsioonist.

Pöörlemiskiirus on suurim tühijooksul, mil $P_2 = 0$. Koormuse P_2 ja seega ankruvoolu I_a suurenemisel suureneb pingelang ankru ahelas I_aR_a ja seega väheneb pöörlemiskiirus. Teiselt poolt hakkab voolu I_a tugevnemisel ilmnema ankrureaktsiooni lahtimagneetiv mõju (vt. p. 4-4), mistõttu väheneb peamagnetvoog Φ ja suureneb pöörlemiskiirus. Tavaliselt on pingelangu I_aR_a mõju suurem ja seetõttu haruvoolumootori pöörlemiskiirus koormuse suurenemisel mõnevõrra väheneb (tavaliselt 3 ... 8% piirides koormuse muutumisel tühijooksust nimikoormuseni).

Kui aga ankrureaktsiooni lahtimagneetiv mõju on tugevam kui pingelang ankru ahelas, siis võib pöörlemiskiirus koormuse suurenedes ka kasvada (kõver *2*). Sama võib põhjustada ka harjade nihutamine neutraaljoonelt vastu mootori pöörlemissuunda. Tekib ankrureaktsiooni pikikomponent, mis mõjub vastu peamagnetvoole, seda nõrgendades.

Haruvoolumootori pöörlemiskiiruse karakteristik kujutab endast abstsisstelje suunas veidi kaldu olevat sirget. Niisugust karakteristikut nimetatakse «jäigaks».

Ankruvoolu karakteristik $I_a = f(P_2)$ algab ordinaatteljel tühijooksule vastavast punktist. Koormuse suurenemisel vool I_a tugevneb. Kuna mootori magnetvoog Φ koormuse suurenemisel väheneb,



Joon. 9-5. Haruvoolumootori töötamiskarakteristikud

siis ankruvoolu kõver ei kujuta endast sirget, vaid kõverat, mis suurematel koormustel pöördub ülespoole. Kuna moment suureneb koos võimsuse kasvuga, siis peab magnetvoo Φ vähenemisel tugevnema ankruvool I_a.

Kasuliku pöördemomendi karakteristik $M = f(P_2)$ kujutaks endast sirgjoont, kui mootori pöörlemiskiirus oleks konstantne. Kuna aga pöörlemiskiirus koormuse suurenemisel veidi väheneb, siis momendi joon suurematel koormustel pöördub ülespoole.

Kasuteguri karakteristikut $\eta = f(P_2)$ on selgitatud p. 6-7.

Haruvoolumootori mehaaniline karakteristik $n = f(M)$ saadakse, kui $U = U_n = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$. Mehaanilise karakteristiku kuju selgub pöördemomendi ja pöörlemiskiiruse valemitest:

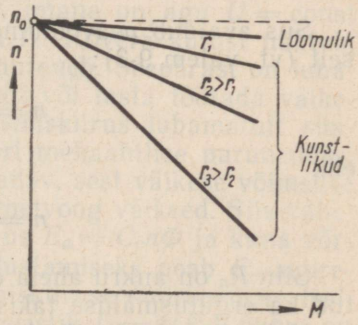
$$M = C_M I_a \Phi \text{ ja } n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}.$$

Asetades pöördemomendi valemist I_a pöörlemiskiiruse valemisse, saame:

$$n = \frac{U - R_a \frac{M}{C_M \Phi}}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} -$$

$$- \frac{R_a}{C_M C_e \Phi^2} M = C_1 - C_2 M. \quad (9\text{-}14)$$

Seega mehaaniline karakteristik

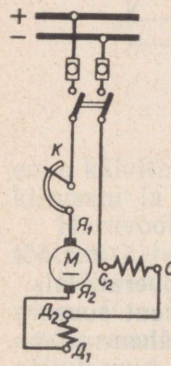


Joon. 9-6. Haruvoolumootori mehaanilised karakteristikud

on abstsisstelje suunas veidi kallak sirge (joon. 9-6). Selline mehaaniline karakteristik kannab loomuliku karakteristiku nimetust, erinevalt karakteristikuist, mis saadakse ankru ahelasse takistuste lülitamisel. Viimastest kõneleme lähemalt pöörlemiskiiruse reguleerimise osas.

9-3. PEAVOOLUMOOTOR

Peavoolumootori lülitusskeem on antud joonisel 9-7. Peavoolumootori ergutusvool I_e on võrdne ankruvooluga I_a, sest ankur ja ergutusmähis on ühendatud järjestikku. Niisiis sõltub peavoolumootori magnetvoog koormusest. Ka peavoolumootori käivitamiseks lülitatakse ankru ahelasse järjestikku käivitusreostaat, et piirata käivitusvoolu tõuget sisselülitamisel. Peavoolumootori käivitusreostaat on konstruktsioonilt lihtsam kui haruvoolumootori oma, sest jääb ära vajadus ergutusmähisele määratud kontaktliistu järele (vrd. joon. 9-3). Käivitamisprotsess toimub põhiliselt analoogiliselt haruvoolumootorile. Peavoolumootoris sõltub ka magnetvoog ankruvoolust.



Joon. 9-7. Peavoolumootori lülitusskeem

Väikestel koormustel võib lugeda magnetvoo võrdeliseks vooluga ja seepärast on siis moment võrdeline voolu ruuduga. Suurtel koormustel magnetahel küllastub ning momendi kasv aeglustub.

Peavoolumootori töötamiskarakteristikud on toodud joonisel 9-8.

Pöörlemiskiiruse karakteristik $n = f(P_2)$ saadakse, kui $U = U_n = \text{const}$. Kuna peavoolumootoris $I_e = I_a$, siis peamagnetvoog muutub koos ankruvoolu ja seega ka koormusega. Kui mitte arvestada masina magnetahela küllastumist, võib lugeda magnetvoo Φ võrdeliseks ankruvooluga I_a:

$$\Phi = aI_a. \tag{9-15}$$

Siis avaldub peavoolumootori pöörlemiskiiruse valem järgmiselt (vt. valem 9-3):

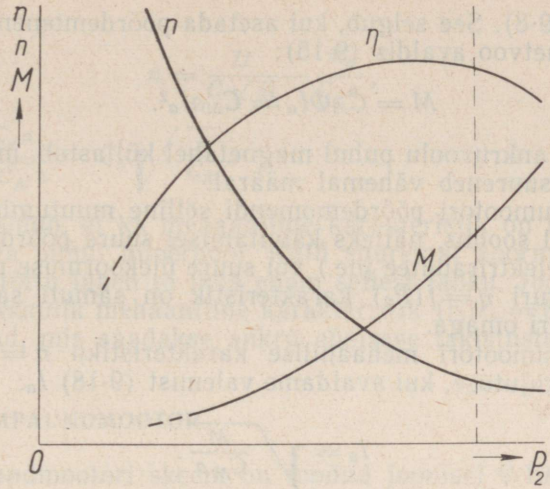
$$n = \frac{U}{C_e a I_a} - \frac{I_a R_a}{C_e a I_a}$$

ehk

$$n = \frac{U}{C_e a I_a} - \frac{R_a}{C_e a}. \tag{9-16}$$

Siin R_a on ankru ahela ekvivalentne takistus, millesse on arvatud ka ergutusmähise takistus.

Valemist (9-16) järeldub, et peavoolumootori pöörlemiskiirus muutub sõltuvalt ankruvoolust I_a hüperboolikujuliselt. Seejuures



Joon. 9-8. Peavoolumootori töötamiskarakteristikud

aga ei ole arvesse võetud ankrureaktsiooni lahtimagneetivat mõju. Oletades, et magnetahel on küllastamata, võib lugeda ankrureaktsiooni mõju samuti võrdeliseks ankruvooluga. Seega peavoolumootori resulteeriv magneetimisergutus on avaldatav järgmiselt:

$$F = I_a w_e - K_a I_a = I_a(w_e - K_a), \qquad (9\text{-}17)$$

kus $I_a w_e$ — ergutusmähise magneetimisergutus,
$K_a I_a$ — ankrureaktsiooni magneetimisergutus,
w_e — ergutusmähise keerdude arv,
K_a — ankrureaktsiooni võrdelisustegur.

Viimasest valemist selgub, et ankrureaktsioon mõjub nii, nagu väheneks ergutusmähise tegelik keerdude arv. Pöörlemiskiiruse karakteristiku kuju näeme joonisel 9-8, kusjuures kõver on antud sõltuvalt kasulikust võimsusest P_2. Viimane on aga $U = \text{const}$ puhul lähedalt võrdeline ankruvooluga I_a. Kõvera kujust nähtub, et väikestel võimsustel kiirus järsult suureneb. Seepärast on lubamatu peavoolumootorit käivitada tühjalt või lasta töötada väikesel koormusel, sest siis kasvab pöörlemiskiirus lubamatult suureks, mis võib põhjustada isegi mootori mehaanilise purunemise. Selline mootori käitumine on ka arusaadav, sest väikese võimsuse puhul on ankruvool I_a ja seega ka magnetvoog väiksed. Siis väheneb ka vastuelektromotoorne jõud ankrus $E_a = C_e n \Phi$ ja kuna võrgupinge $U = \text{const}$, siis selle tasakaalustamiseks peab E_a suurenema, mis saab toimuda vaid pöörlemiskiiruse suurenemise teel.

Peavoolumootori ankruvoolu karakteristik $I_a = f(P_2)$ puhul on sarnane haruvoolumootori vastava karakteristikuga.

Kasuliku momendi $M_2 = f(P_2)$ karakteristik on paraboolikuju-

line (joon. 9-8). See selgub, kui asetada pöördemomendi valemisse (8-3) magnetvoo avaldis (9-15):

$$M = C_M \Phi I_a = C_M a I_a^2. \qquad (9\text{-}18)$$

Tugeva ankruvoolu puhul magnetahel küllastub, mistõttu pöördemoment suureneb vähemal määral.

Peavoolumootori pöördemomendi selline muutumine on paljudel juhtudel soodus, näiteks käivitamisel suure pöördemomendiga (kraanad, elektriraudtee jne.) või suure ülekoormuse puhul.

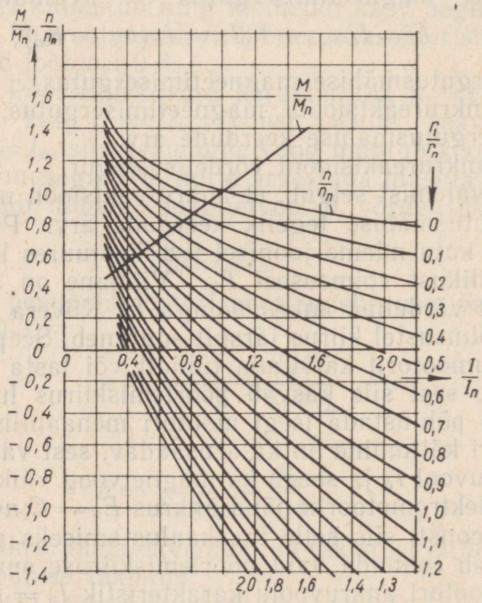
Kasuteguri $\eta = f(P_2)$ karakteristik on samuti sarnane haruvoolumootori omaga.

Peavoolumootori mehaanilise karakteristiku $n = f(M)$ kohta saame ettekujutuse, kui avaldame valemist (9-18) I_a:

$$I_a = \sqrt{\frac{M}{C_M a}}.$$

Asetades I_a avaldise pöörlemiskiiruse valemisse (9-16), saame:

$$n = \frac{U}{C_e a \sqrt{\frac{M}{C_M a}}} - \frac{R_a}{C_e a},$$



Joon. 9-9. Peavoolumootori mehaanilised karakteristikud

ehk

$$n = \frac{U}{C\sqrt{M}} - \frac{R_a}{C_e a}, \qquad (9\text{-}19)$$

kus $C = \frac{C_e a}{\sqrt{C_M a}} = C_e \sqrt{\frac{a}{C_M}}$.

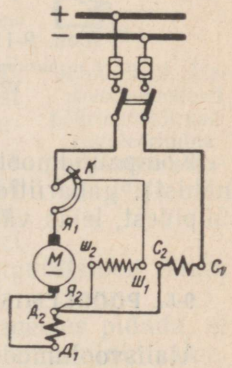
Siit järeldub, et ka mehaaniline karakteristik on küllastamata magnetahela puhul hüperbool. Kuid suuremal koormusel tekkiva küllastuse tõttu läheb ta ikka enam sellest lähku. Joonisel 9-9 on näha nii loomulik mehaaniline karakteristik ($r_1/r_n = 0$) kui ka karakteristikud, mis saadakse ankru ahelasse takistuste lülitamisel.

9-4. KOMPAUNDMOOTOR

Kompaundmootori skeem on toodud joonisel 9-10. Selle mootori üks ergutusmähis on ühendatud ankru vooluahelaga järjestikku, teine aga paralleelselt. Sõltuvalt nende ergutusmähiste poolt tekitatud magneetimisergutuste vastastikusest suurusest ja suunast võivad kompaundmootori pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi karakteristikud omada mitmesuguse kuju.

Kui oletada, et masina magnetahel on küllastamata, siis liituvad haruvoolu- ja peavooluergutusmähiste magnetvood Φ_m ja Φ_c samuti, kui liituvad nende mähiste magneetimisergutused. Seega pöörlemiskiirus

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e(\Phi_m \pm \Phi_c)}. \qquad (9\text{-}20)$$



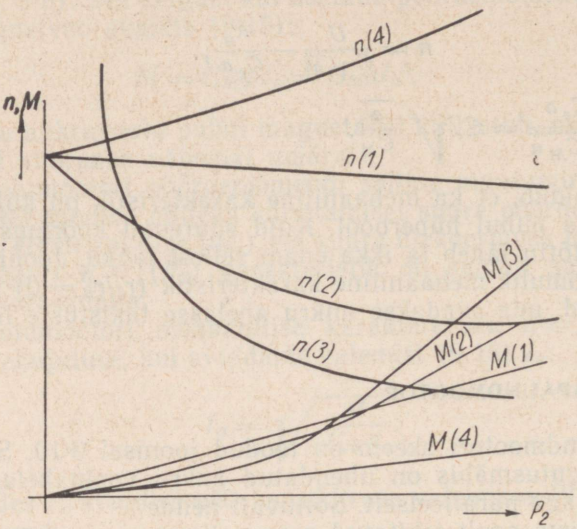
Joon. 9-10. Kompaundmootori lülitusskeem

Samuti avaldub pöördemoment:

$$M = C_M(\Phi_m \pm \Phi_c) I_a. \qquad (9\text{-}21)$$

Pärikompaundmootori puhul magnetvood liituvad ja seega selline mootor on omadusilt haruvoolu- ja peavoolumootori vahepealne [joonisel 9-11, kõverad $n(2)$ ja $M(2)$].

Vastukompaundmootori töötamistingimused on ebastabiilsed. Ergutusmähiste vastusuunalise ühenduse tõttu koormuse suurenemisel resulteeriv magnetvoog ($\Phi_m - \Phi_c$) väheneb, mistõttu pöörlemiskiirus suureneb. Muutumatu suurusega staatilise momendi puhul peab aga ankruvool tugevnema (sest magnetvoog väheneb), mis põhjustab omakorda magnetvoo vähenemise, pöörlemiskiiruse suurenemise jne. Joonisel 9-11 kõver $n(4)$ ja $M(4)$ vastavad suhteliselt tugevasti vastukompaunditud mootorile.



Joon. 9-11. Kompaundmootori töötamiskarakteristikud:
1 — haruvoolumootor; *2* — pärikompaunditud mootor; *3* — peavoolumootor; *4* — vastukompaunditud mootor

Kompaundmootor, olles ehituselt keerulisem (kaks ergutusmähist), gabariitidelt suurem ja seega ka hinnalt kallim teistest tüüpidest, leiab vähem kasutamist.

9-5. PÖÖRLEMISKIIRUSE REGULEERIMINE

Alalisvoolumootorite pöörlemiskiirust on võimalik muuta sujuvalt ja suurtes piirides. Selle poolest on alalisvoolumootorid paremate omadustega kui vahelduvvoolumootorid ja leiavad teatud juhtudel kasutamist (elektrivedu, elektritõstukid metallurgiatehastes, paberitööstus jne.).

Kui ühendada järjestikku ankru mähisega reostaat takistusega r_r, siis valemi (9-1) kohaselt on mootori pingetevaheline seos järgmine:

$$U = E_a + I_a(R_a + r_r).$$

Arvesse võttes, et $E_a = C_e \Phi n$, saame:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + r_r)}{C_e \Phi}. \qquad (9\text{-}22)$$

Sellest avaldisest järeldub, et alalisvoolumootori pöörlemiskiirust võib reguleerida järgmiselt:

1) ankru ahelale rakendatud võrgupinge U muutmise teel;

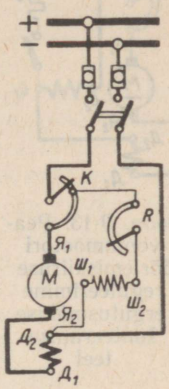
2) ankru ahelasse järjestikku ühendatud lisatakistuse r_r muutmise teel;

3) magnetvoo Φ muutmise teel.

Kõige sagedamini kasutatakse haruvoolumootorite puhul viimast moodust. Selleks ühendatakse haruvoolu- ja kompaundmootorite haruvoolu-ergutusmähisega järjestikku muudetava takistusega ergutusreostaat (joon. 9-12).

Vastavalt avaldisele (9-22) suureneb ergutusvoolu nõrgendamisel pöörlemiskiirus ja vastupidi. Kuid ergutusvoolu liigsel nõrgendamisel väheneb tunduvalt magnetvoog ning seetõttu kasvab ankruvool I_a ning ankru pöörlemiskiirus n, nagu nähtub valemitest (8-3) ja (9-3).

Tõepoolest, kui koormus ja seega pöördemoment M jäävad muutumatuks, siis ankruvool $I_a = \frac{M}{C_M \Phi}$, kui magnetvoo Φ vähenemisel tugevneb. Samal ajal pöörlemiskiirus tunduvalt suureneb, sest $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$, mis võib muutuda mootorile mehaaniliselt ohtlikuks ja põhjustada mootori purunemise. Praktiliselt võib sel viisil kiirust muuta vahekorras kuni 1 : 3. Kuna haruvoolu-ergutusmähise vool on võrreldes ankruvooluga väga nõrk, siis kadu ergutusreostaadis on samuti väike ja seega on selline reguleerimisviis ökonoomne.



Joon. 9-12. Haruvoolumootori pöörlemiskiiruse reguleerimine ergutusreostaadiga

Pöörlemiskiiruse suurendamist piirab mootori ankru mehaaniline tugevus ning halvenev kommutatsioon suure kiiruse puhul.

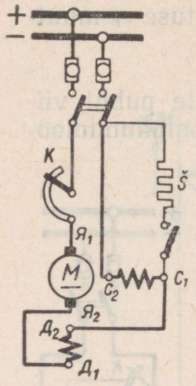
Haruvoolumootori käivitamisel tuleb ühtlasi meeles pidada, et käivitamise ajal peab ergutusreostaadi takistus olema minimaalne. Vastasel korral tekib käivitamisel suur voolutõuge ja mootori pöörlemiskiirus võib muutuda ülemäära suureks.

Peavoolumootori pöörlemiskiirust saame samal põhimõttel muuta ergutusmähise šunteerimise teel (joon. 9-13). Kui ergutusmähise takistus r_e ja šunteeriva takistuse suurus on r, siis vool ergutusmähises šunteerimisel

$$I_e = I_a \frac{r_e}{r_e + r}.$$

Ergutusvoolu nõrgendamisel väheneb ka magnetvoog ja suureneb pöörlemiskiirus (kui pöördemoment on konstantne). Ankruvool seejuures tugevneb. Nii saab kiirust suurendada 1,5 korda ja isegi enam.

Peavoolumootori pöörlemiskiirust saab muuta ka ankru mähise šunteerimise teel (joon. 9-14). Niisugusel juhul ankruvool nõrgeneb, kuid konstantse momendi korral tugevneb võrgust võetav vool



Joon. 9-13. Peavoolumootori pöörlemiskiiruse reguleerimine ergutusmähise šunteerimise teel

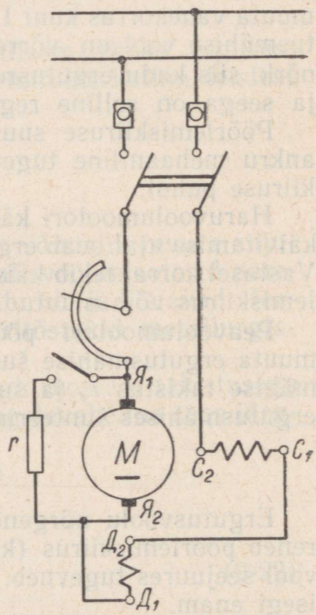
ja samuti ka ergutusvool. Seega suureneb magnetvoog ja väheneb pöörlemiskiirus. Võrgust võetav võimsus P_1 kasvab, sest kasulik võimsus $P_2 = M_2\omega$ väheneb. Niisugune reguleerimisviis on seega ebamajanduslik ja leiab vähe kasutamist. Sel viisil saab kiirust vähendada samas ulatuses kui ergutusmähise šunteerimisegagi.

Kui ühendada alalisvoolumootori ankru mähisega järjestikku lisatakistus, tekib selles lisapingelang ning pinge ankru klemmidel langeb. Vastavalt valemile (9-22) väheneb seetõttu ka mootori pöörlemiskiirus. Kui mootori pöördemoment on konstantne, siis jääb ka ankruvool endiseks. Kasulik võimsus väheneb võrdeliselt pöörlemiskiirusega. Seega ka kasutegur väheneb. Kirjeldatud reguleerimisprotsess toimub analoogiliselt nii haruvoolu- kui ka peavoolumootori puhul. Joonisel 9-2 antud haruvoolumootori skeem vastab ka kirjeldatud pöörlemiskiiruse reguleerimise skeemile. Käivitusreostaat tuleb aga asendada vastava reguleerimisreostaadiga, mis peab olema arvutatud kestvalt voolu all olekule, mitte aga ainult lühiajaliseks töötamiseks. Joonisel 9-6 ja 9-9 on antud mehaanilised karakteristikud ankru ahelasse ühendatud mitmesuguste takistuste puhul.

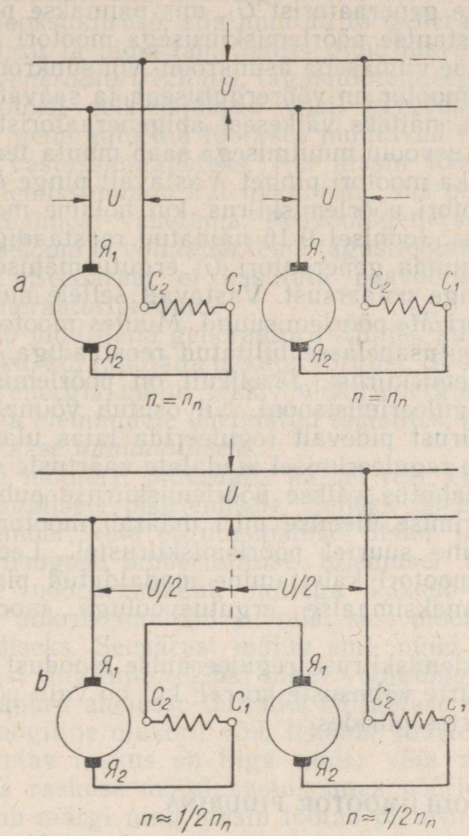
Pöörlemiskiiruse reguleerimine toitepinge muutmise teel on võimalik siis, kui mootorit toidetakse reguleeritava pingega vooluallikast. Peavoolumootorite pöörlemiskiirust saab astmeliselt reguleerida ka konstantse pingega võrgust toitmisel, kui kaht peavoolumootorit ühendada samasse võrku kord paralleelselt, kord järjestikku (joon. 9-15). Sellist reguleerimisviisi kasutatakse elektriveol (tramm, elektriraudtee).

Kuna järjestikühenduses on pinge iga mootori klemmidel poole madalam kui paralleelühenduse korral, siis ka pöörlemiskiirus on sel juhul umbes poole väiksem (vt. valem 9-3).

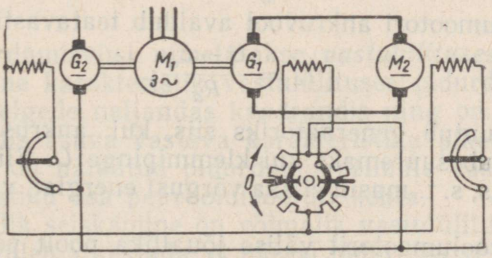
Väga laiades piirides (kuni 1 : 20 ja enamgi) saab mootori pöörlemiskiirust muuta siis, kui toita teda eraldi reguleeritavast vooluallikast. Tuntumaid selliseid lülitusi on nn. *Leonardi lülitus*



Joon. 9-14. Peavoolumootori pöörlemiskiiruse reguleerimine ankru šunteerimise teel



Joon. 9-15. Peavoolumootorite pöörlemiskiiruse astmeline reguleerimine



Joon. 9-16. Leonardi lülitus

(joon. 9-16). Selle lülituse kohaselt toidetakse reguleeritavat mootorit M_2 omaette generaatorist G_1, mis pannakse pöörlema mingi praktiliselt konstantse pöörlemiskiirusega mootori M_1 poolt. Enamasti kasutatakse viimasena asünkroon- või sünkroonmootorit. Nii generaator kui mootor on võõrergutusega ja saavad ergutust kõrvalisest allikast, näiteks väikesest abigeneraatorist G_2. Peageneraatori G_1 ergutusvoolu muutmisega saab muuta tema klemmipinget U ja seega ka mootori pinget. Vastavalt pinge U muutumisele muutub ka mootori pöörlemiskiirus, kui hoiame mootori ergutusvoolu konstantse. Joonisel 9-16 näidatud reostaadiga saab muuta ergutusvoolu suunda generaatori G_1 ergutusmähises ja seega ka tema klemmipinge polaarsust. Vastavalt sellele muutub ka reguleeritava mootori M_2 pöörlemisuund. Muutes mootori M_2 ergutusvoolu tema ergutusahelasse lülitatud reostaadiga, saame samuti mõjutada pöörlemiskiirust. Järelikult on pöörlemiskiiruse muutmiseks kaks reguleerimistsooni. Nii osutub võimalikuks mootori M_2 pöörlemiskiirust pidevalt reguleerida laias ulatuses. Piiriks pöörlemiskiiruse reguleerimisel madalate väärtuste suunas on halvenev masina jahutus väikse pöörlemiskiiruse puhul. Pöörlemiskiiruse reguleerimise ülemise piiri määrab mootori kommuteerimise halvenemine suurtel pöörlemiskiirustel. Leonardi lülituse puhul toimub mootori käivitamine madaldatud pingega mootori klemmidel ja maksimaalse ergutusvooluga mootori ergutusmähises.

Säärast pöörlemiskiiruse reguleerimise moodust on majanduslik kasutada suurte võimsuste korral, kui on vaja pöörlemiskiirust reguleerida suurtes piirides.

9-6. ALALISVOOLUMOOTOR PIDURINA

Mootori kiireks peatamiseks, näiteks selleks, et muuta pöörlemissuunda, on vaja teda pidurdada. Alalisvoolumootorite pidurdamine võib toimuda generaatorirežiimis, vastulülituses või dünaamiliselt.

Alalisvoolumootori ankruvool avaldub teatavasti valemiga

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}.$$

Mootor muutub generaatoriks siis, kui ankrus indutseeritud emj. E_a muutub suuremaks kui klemmipinge U. Siis muutub vool I_a negatiivseks, s. t. masin ei saa võrgust energiat, vaid annab seda võrku.

Kui haruvoolumootorit välise jõuallika poolt pöörlema panna samas suunas, kuid suurema kiirusega kui ta mootorina pöörles, siis tema ankrus indutseeritud emj. E_a muutub lõpuks klemmipingest U suuremaks. Masin läheb üle generaatorirežiimi, ilma et tema lülituses oleks midagi muudetud. Seda asjaolu võib kasutada

näiteks elektriraudteel. Kui allamäge sõites mootori pöörlemiskiirus ületab tühijooksukiiruse, siis muutub ta generaatoriks, annab voolu tagasi võrku ja pidurdab. Sellist pidurdusviisi nimetatakse *pidurdamiseks generaatorirežiimis,* tagasitöötamisega võrku.

Peavoolumootorit eelkirjeldatud viisil generaatorirežiimi üle viia ei saa, sest generaatorina töötades muutuvad tema ankruvool ja ergutusvool vastassuunalisteks. Kui masin töötab generaatorina sama pöörlemissuunaga kui mootorina, siis peab tema ergutusmähise otsad ümber vahetama. Peavoolugeneraatori koormuskarakteristiku iseloom ei võimalda tema tagasitöötamist konstantse pingega võrku. Seepärast ei kasutata peavoolumootori puhul pidurdamist generaatorirežiimis.

Mootorit võib pidurdada generaatorirežiimis, kuid ilma tagasitöötamiseta võrku, kui lahutada mootor võrgust. Siis liikuvate masside kineetilise energia mõjul tekkiv elektrienergia muundatakse soojuseks masina klemmidele ühendatud takistites. Sellist pidurdamisviisi nimetatakse *dünaamiliseks.*

Lõpuks saab mootorit pidurdada ka sel teel, et ta lülitatakse ümber vastusuunalisele pöörlemisele. Selleks ühendatakse ankru mähise otsad ümber, kuid ergutusmähise otsad jäetakse ümber ühendamata. Niisuguse ümberlülituse tulemusel tekib mootoris vastassuunaline pöördemoment, millega kaasub tugev voolutõuge. Emj. E_a ankrus muudab suunda, sest mootori pöörlemissuund jääb endiseks. Seepärast mõjub emj. nüüd samas suunas kui pinge, millest tingituna tekibki tugev voolutõuge. Viimase piiramiseks peab ankru ahelasse lülitama küllaldase suurusega lisatakistuse. Analoogiline olukord võib tekkida suurte raskuste tõstmisel. Kui tõstetav raskus on liiga suur, võib mootor seisma jääda ja hakata raskuse mõjul vastusuunas pöörlema. Emj. E_a mootoris muudab märgi ning masin töötab pidurina. Vool ankrus sellisel juhul avaldub valemist

$$I_a = \frac{U + E_a}{R_a}.$$

Sellist pidurdamisviisi nimetatakse *vastulülituses pidurdamiseks.* Mehaaniline karakteristik vastulülituses pidurdamisel asetseb koordinaattelgede neljandas kvadrandis ning on mootori esimeses kvadrandis asuva vastava karakteristiku pikenduseks.

Joonisel 9-9 on näidatud pidurdamisrežiimile vastava mehaanilise karakteristiku osa peavoolumootori kohta.

Mootori täielik seiskamine on võimalik vastulülituses pidurdamise abil, kuid tuleb arvestada, et pärast pidurdamist hakkab mootor pöörlema vastupidises suunas.

ERITÜÜPI ALALISVOOLUMASINAD

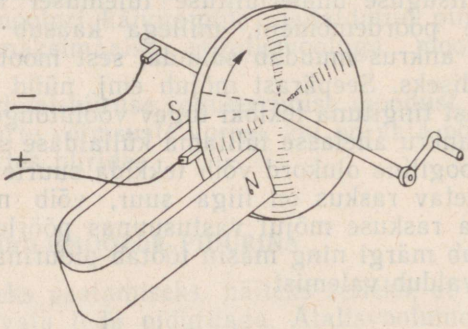
10-1. UNIPOLAARMASIN

Eritüüpi alalisvoolumasinate all mõistame niisuguseid masinaid, mis erinevad eespool kirjeldatud normaalsetest masinatest kas töötamispõhimõttelt või konstruktsioonilt.

Allpool tutvume mõnede suuremat tähtsust omavate eritüüpidega.

Alalisvoolumasina ehitamisel ja ekspluateerimisel on kõige raskem masina kommuteerimise küsimus. Seepärast on mõistetav püüd vabaneda alalisvoolu saamisel kommutaatorist. Unipolaarmasin ongi alalisvoolumasin, millel puudub tavalisele alalisvoolumasinale omane kommutaator.

Unipolaarmasina töötamispõhimõte selgub joonisel 10-1 toodud lihtsast skeemist. Püsivmagnetipooluste vahel pöörleb juhtivast ainest ketas. Kujutleme, et ketas koosneb üksikutest sektoritest (joonisel 10-1 näidatud kriipsjoonega). Sellist sektorit võib



Joon. 10-1. Unipolaarmasina skeem

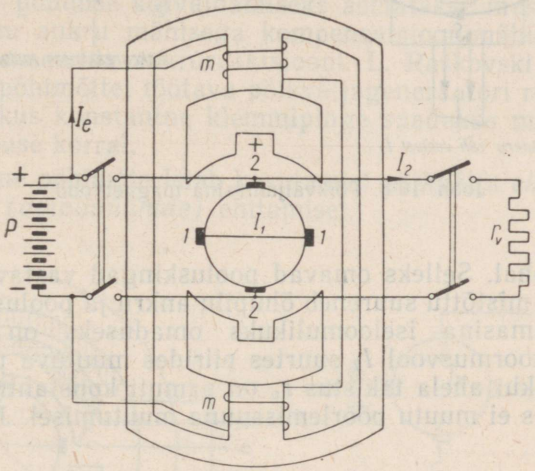
vaadelda magnetväljas liikuva juhtmena. Rakendades parema käe reeglit, leiame emj. suuna selles juhtmes. Emj. on antud juhul suunatud ketta keskkohast tema ääre poole. Seega kui asetada üks hari võllile ja teine ketta servale ning ühendada need harjad mingi vooluahelaga, siis tekib selles ahelas alalisvool. Emj. on võrdeline magnetilise induktsiooniga, juhtme pikkusega ning juhtme liikumiskiirusega. Ettekujutatavate juhtmete suhteliselt väikese pikkuse tõttu kettal peavad teatud emj. saamiseks induktsioon ning ketta pöörlemise kiirus olema suhteliselt suured. Praktiliselt teostatud masinais saadakse väga madal pinge, kuid seejuures väga tugev vool suhteliselt suure pöörlemiskiiruse juures.

Unipolaarmasinad ei täitnud neile pandud lootusi, sest ka siin

tekkis raskusi tugevale voolule sobivate kontaktide ja harjade konstrueerimisel. Seetõttu leiavad unipolaarmasinad tänapäeval kasutamist erijuhtudel, näiteks elektrolüüsil.

10-2. PÕIKVÄLJAGENERAATOR

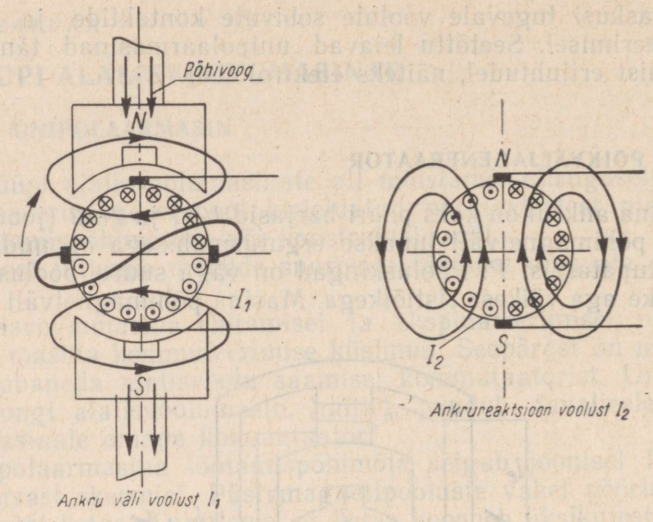
Masina ankrul on kaks paari harjasid *1—1* ja *2—2* (joon. 10-2). Masina põhimagnetväli luuakse ergutusmähisega *m*, mida toidetakse akupatareist *P*. Pooluskingad on väga suure, pooluse südamik ja ike aga väikese ristlõikega. Masina põhimagnetväli on suh-



Joon. 10-2. Põikergutusega generaator

teliselt nõrk ja seetõttu tekib ankru pöörlemisel harjadel *1—1* suhteliselt väike emj. E_a. Selle emj. mõjul tekib suhteliselt tugev vool I_1, sest harjad *1—1*, mis asuvad põhimagnetvoo suhtes neutraaljoonel, on lühistatud. Selle voolu mõjul tekib tugev ankru põikimagnetväli, mis läbib suure ristlõikega pooluskingi (joon. 10-3). Põikmagnetvälja neutraaljoonele on paigutatud harjad *2—2*, mis ühendatakse välise koormustakistusega r_v. Ankru pöörlemisel tekitatud emj. E_2 mõjul tekib ahelas vool I_2. Läbides ankru mähist, tekitab see vool omakorda ankru põikmagnetvälja, mis on suunatud piki pooluste telge masina põhimagnetväljale (ergutusmähises *m—m*) vastu. Seega resulteeriv põhivoog tekib ergutusmähise *m—m* konstantse magneetimisergutuse ja ankru pikireaktsiooni muutuva magneetimisergutuse vahena.

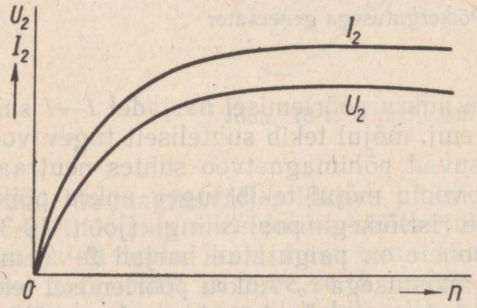
Kommuteerimise parandamiseks suurendatakse õhupilu har-



Joon. 10-3. Põikväljamasina magnetvood

jade *2—2* kohal. Selleks omavad pooluskingad vastava sisselõike (joon. 10-2), mistõttu suureneb õhupilu ankru ja pooluse vahel.

Põikväljamasina iseloomulikuks omaduseks on praktiliselt konstantne koormusvool I_2 suurtes piirides muutuva pöörlemiskiiruse juures, kui ahela takistus r_v on samuti konstantne. Generaatori polaarsus ei muutu pöörlemissuuna muutumisel. Joonisel 10-4



Joon. 10-4. Põikväljageneraatori karakteristikud

on antud põikväljageneraatori karakteristikud. Niisugune generaator leiab laialdast kasutamist rongide valgustusdünamona, kus ta pannakse pöörlema vahetult vaguni rataste võllilt. Suurte kiiruste või vastusuunalise liikumise puhul sellise generaatori pinge ei muutu ei suuruselt ega polaarsuselt ja seepärast ei vaja generaa-

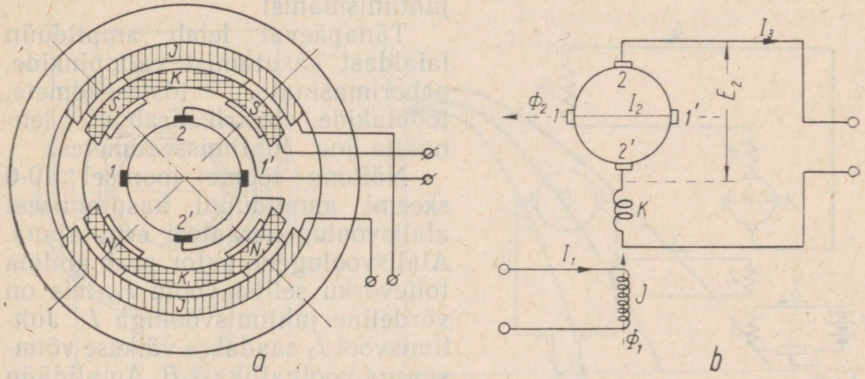
tor ergutuse reguleerimist. Väikestel kiirustel toidetakse rongi valgustust akupatareist, kusjuurest lüliti *a—a* jääb alaliselt suletuks, ankur aga ühendatakse lahti.

10-3. ELEKTRIMASIN-VÕIMENDAJA

Põikväljamasin annab konstantse pinge muutuval kiirusel vaid siis, kui koormusahela vool on konstantne. Muutuva voolu korral põhjustab ankrureaktsioon pikitelje magnetvoo muutumise, mis omakorda põhjustab põikvälja ja sellega kaasneva pinge muutumise masina klemmidel.

Nimetatud puuduse kõrvaldamiseks asetatakse masina pikiteljele järjestikku ankru mähisega kompensatsioonimähis, mis võimaldab kompenseerida ankrureaktsiooni. L. Raškovski konstrueeris eeltoodud põhimõttel töötava põikväljageneraatori rongide valgustamiseks, kus konstantne klemmipinge saadakse muutuva kiiruse ja koormuse korral.

Analoogiline põhimõte leiab kasutamist põikvälja *elektrimasin-võimendajate (amplidüünide)* ehitamisel.



Joon. 10-5. Amplidüün:
a — ühendusskeem; *b* — põhimõtteskeem

Amplidüüni (joon. 10-5) kommutaatoril on kaks paari harjasid: tööharjad *2—2'* on ühendatud kompensatsioonimähisega, mis kompenseerib täielikult ankrureaktsiooni pikiteljel; harjad *1—1'* on lühistatud, nagu igas põikväljamasinas. Poolustele on asetatud veel juhtimismähis, milles tekitatakse voolu I_1 mõjul põhimagnetvoog Φ_1. Analoogiliselt eelmises punktis kirjeldatule, tekib ankru mähises lühistatud harjade *1—1'* poolt loodud ahelas vool I_2. See vool tekitab ankrureaktsiooni põikvoo Φ_2. Ankru pöörlemisel voog

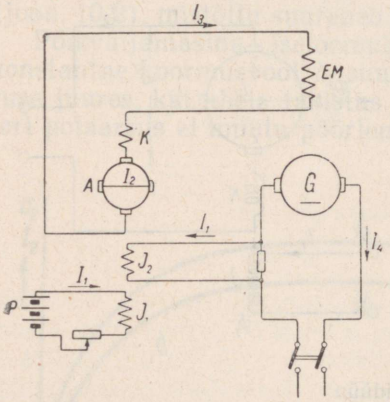
Φ_2 indutseerib harjadel 2—2′ emj. E_2, mis põhjustab juhitavas ahelas mitmekordselt võimendatud voolu I_3. Kuna ankrureaktsioon on kompenseeritud, siis on küllalt väikesest juhtimisvoolust I_1, et tekitada juhtivas süsteemis mitmekordne vool I_3. Joonisel 10-5, *a* on näidatud pooluste ja nendel asuvate mähiste asetus. Antud masin on kahepooluseline, kusjuures üksikud poolused on lõhestatud kaheks osaks, mis asuvad üksteisest eemal. Mõlemale ühe pooluse osale on asetatud kaks mähist — kompensatsioonimähis K ja juhtimismähis J.

Amplidüüni iseloomulikuks suuruseks on võimendustegur. Võimsuse võimendamine toimub kahes astmes: juhtmähisesse antav võimsus $P_1 = U_1 I_1$ võimendatakse võimsuseks $P_2 = E_2 I_2$ lühistatud harjadega ankrumähise ahelas; viimane võimendatakse võimsuseks $P_3 = U_3 I_3$ juhitavas ahelas.

Suhet

$$\frac{P_3}{P_1} = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_3}{P_2} = K \qquad (10\text{-}1)$$

nimetatakse amplidüüni võimendusteguriks. See tegur ulatub suuruseni $K = 10\,000$. Amplidüün võib omada kuni neli ergutus- või juhtimismähist.



Joon. 10-6. Alalisvoolugeneraatori ergutamise skeem amplidüüniga

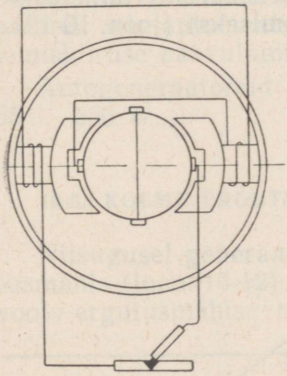
Tänapäeval leiab amplidüün laialdast kasutamist valtspinkide, paberimasinate, tõsteseadmete, tööpinkide, elektrikaarahjude, lennukite jne. juhtimisseadmetes.

Näitena toome joonisel 10-6 skeemi amplidüüni kasutamisest alalisvoolugeneraatori ergutajana. Alalisvoolugeneraator peab andma toitevõrku sellist voolu I_4, mis on võrdeline juhtimisvooluga I_1. Juhtimisvool I_1 saadakse väikese võimsusega vooluallikast B. Amplidüün omab veel teise juhtimismähise J_2, mis on lülitatud paralleelselt juhitava generaatori G peavooluahelas asuva šundiga.

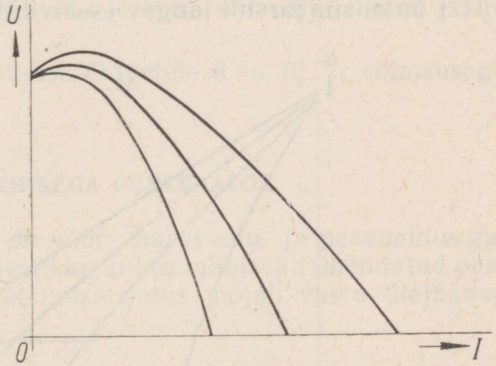
Teise juhtimismähise J_2 magneetimisergutus on vastassuunaline esimese juhtimismähise J_1 magneetimisergutusega. Kui näiteks generaatori vool I_4 tugevneb, suureneb ka juhtimismähise I_2 vastumõju, mille tulemusel väheneb amplidüüni ergutus ja tema pinge ning vool juhitava generaatori ergutusmähises *EM*. Generaatori vool nõrgeneb seetõttu endise väärtuseni. Niisuguse lülitusega on saavutatav mõneprotsendiline reguleerimistäpsus.

Tänapäeval on nii tootmisprotsessis kui ka mitmesuguste seadmete remontimisel väga laialdaselt kasutusel elektrikeevitus. Elektrikeevitusel kasutatakse vooluallikatena alalisvoolu-keevitusgeneraatoreid ja keevitustrafosid. Keevitusvoolu allikas peab taluma kaarleegi süütamisel tekkivat lühist ja tagama enam-vähem püsiva voolu kaarleegi muutuva takistuse (pikkuse) puhul. Antud tingimuste täitmine on võimalik, kui keevitusvoolu allika väliskarakteristik on tugevalt langeva iseloomuga. Niisugusel korral põleb kaarleek stabiilselt, sest pinge suured kõikumised põhjustavad väikesi voolu muutusi. Seepärast kasutatakse keevitamisel tavalise alalisvoolugeneraatori asemel erikonstruktsiooniga keevitusgeneraatoreid. Tutvume allpool mõningate alalisvoolu-keevitusgeneraatorite tüüpidega.

Põikvälja-keevitusgeneraator. Kui jätta põikvälja-generaatoris ära juhtimismähised ning ühendada järjestikku tugev kompensatsioonimähis, mis ületaks ankrureaktsiooni mõju, siis saame peavoolu-põikväljamasina, mida kasutatakse elektrikeevituse vooluallikana. Generaator töötab konstantsel pöörlemiskiirusel muutuvale välistakistusele (joon. 10-7).



Joon. 10-7. Põikvälja-keevitusgeneraator

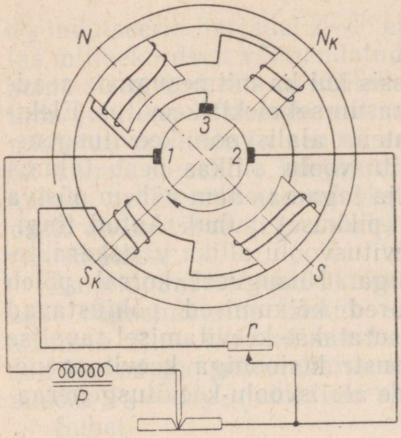


Joon. 10-8. Põikvälja-keevitusgeneraatori väliskarakteristikud

Sellise generaatori pinge U (joon. 10-8) koormusvoolu I tugevnemisel algul tõuseb ja langeb seejärel kiirelt nullini (lühisel).

Järsuma languga väliskarakteristikute saamiseks keeratakse pooluse südamikku vastava mehhanismi abil väljapoole. Suurenenud magnetilise takistuse tõttu väheneb kasulik voog masinas, sest puistevoog suureneb.

Kolme harjaga keevitusgeneraator. Kolme harjaga keevitusge-

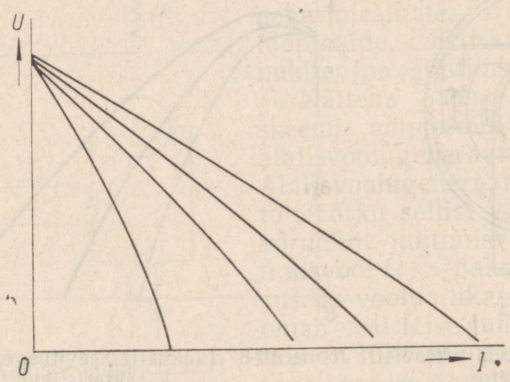


Joon. 10-9. Kolme harjaga keevitusgeneraator

neraatori poolused on lõhestatud kaheks osaks. Üks osa on suurema ja teine väiksema ristlõikega (joonisel 10-9 N ja N_k ning S ja S_k). Kõikidel pooluste osadel on järjestikku ühendatud mähised. Ühe otsaga on need mähised ühendatud kahe tööharja *1—2* vahel asuva kolmanda harja *3* külge, teise otsaga tööharja *2* külge.

Generaatori ankru pöörlemissuund peab olema nii valitud, et ankur jookseks pooluste osadele N—S peale, kuid osadelt N_k—S_k maha. Ankrureaktsiooni mõjul pooluste N ja S kohal magnetväli nõrgeneb, pooluste N_k ja S_k kohal aga tugevneb. Kuna viimaste pooluste ristlõige on väike, siis nad küllastuvad tugevasti ja nende magnetväli praktiliselt ei kasva. Seetõttu ankrureaktsiooni mõjul resulteeriv magnetvoog ja seega ka emj. harjadel *1—2* vähenevad.

Vaadeldavat tüüpi keevitusgeneraatori väliskarakteristik $U = f(I)$ on niisiis järsult langev (sobiv keevitamiseks) (joon. 10-10).



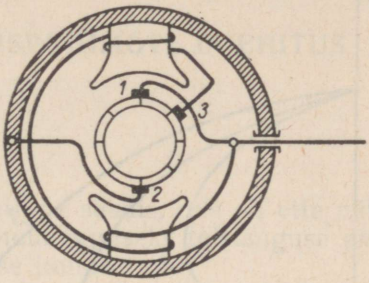
Joon. 10-10. Kolme harjaga keevitusgeneraatori väliskarakteristikud

Harjade *3* ja *2* vaheline pinge jääb praktiliselt muutumatuks, sest pooluste N_k ja S_k magnetvoog muutub vähe. Seega muutub ergutusmähise vool samuti vähe.

Kõikide harjade üheaegne nihutamine geomeetrilise neutraaljoone kohalt ühele või teisele poole põhjustab ankrureaktsiooni

lahtimagneetiva mõju muutumist pooluste N ja S suhtes, kuna aga pooluste N_k ja S_k magnetvoog muutub vähe. Järelikult saab nii mõjutada väliskarakteristiku asendit (langu).

Kolme harjaga keevitusgeneraatorile on ehitusviisilt sarnane kolme harjaga autogeneraator. See generaator annab praktiliselt konstantse voolu pöörlemiskiiruse muutumisel väga suurtes piirides (kuni 1 : 6). Sellise generaatori ühendusskeem on näha joonisel 10-11. Generaatori peaharjad *1—2* on asetatud kommutaatorile nii, et ankru magneetimisergutus oleks pooluste magneetimisergutusega vastassuunaline. Ergutusmähis on ühendatud peaharja *1* ja selle suhtes mingi nurga all asuva abiharja *3* vahele. Muutuva pöörlemiskiiruse puhul ankrureaktsiooni vastumõju ja muutuv pinge harjade *1* ja *3* vahel tagavad praktiliselt konstantse koormusvoolu. Tühijooksul tõuseb autogeneraatori pinge kõrgeks ja seepärast töötab generaator alati koormusele. Selleks on tavaliselt generaatorile paralleelselt ühendatud akupatarei, mis automaatselt lülitatakse sisse või välja teatud pöörlemiskiiruse saavutamisel.

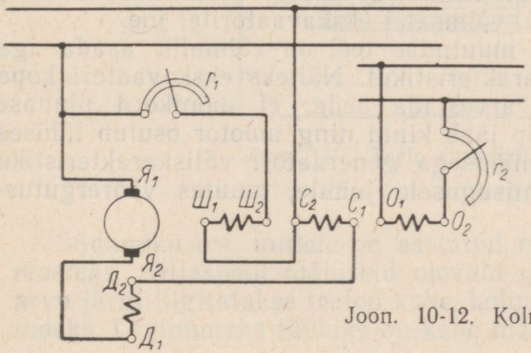


Joon. 10-11. Kolme harjaga autogeneraator

Autogeneraatoreid ehitatakse pingetele 6 ja 12 V, võimsusega 65 . . . 250 W.

10-5. KOLME ERGUTUSMÄHISEGA GENERAATOR

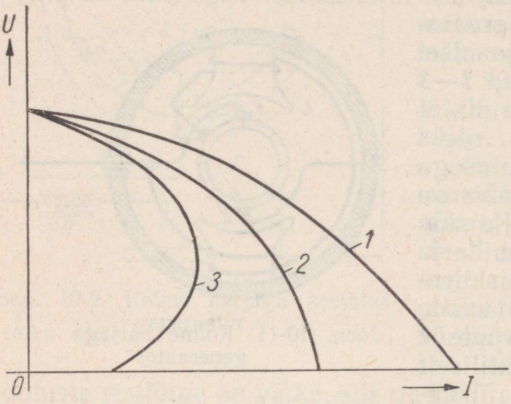
Niisugusel generaatoril on võõr-, haruvoolu- ja peavoolu-ergutusmähis (joon. 10-12). Järjestikku ankru mähisega ühendatud peavoolu-ergutusmähise magneetimisergutus mõjub vastu ülejäänud



Joon. 10-12. Kolme ergutusmähisega keevitusgeneraator

kahe ergutusmähise magneetimisergutusele. Skeem on antud joonisel 10-12.

Haruvoolu- ja võõrergutusmähise ahelais olevate takistuste r_1 ja r_2 muutmisega saame teatud piirides muuta generaatori väliskarakteristiku kuju (joon. 10-13).



Joon. 10-13. Kolme ergutusmähisega keevitusgeneraatori väliskarakteristikud:
1 — võõrergutusega $I_1 \neq 0$; $I_2 = 0$; *2* — võõr- ja haruvoolu-ergutusega $I_1 \neq 0$; $I_2 \neq 0$; *3* — haruvooluergutusega $I_1 = 0$; $I_2 \neq 0$

Näiteks kui võõrergutusmähises on vool I_1 ja paralleelselt ühendatud ergutusmähises voolu pole ($I_2 = 0$), siis omab generaatori väliskarakteristik võõrergutusega generaatori karakteristiku kuju (kõver *1*). Kui vool on ainult paralleelses ergutusmähises ($I_2 \neq 0$) ja võõrergutusmähises vool puudub ($I_1 = 0$), siis generaatori karakteristik on sarnane haruvoolugeneraatori karakteristikuga (kõver *3*). Kui vool on nii võõr- kui ka paralleelses ergutusmähises, siis on generaatori väliskarakteristik eelmiste vahepealne (kõver *2*).

Järjestikku ühendatud ergutusmähise ülesandeks on vähendada lühisvoolu, sest voolu tugevnemisel peavoolu-ergutusmähise vastumõju tõttu generaatori klemmipinge langeb ja seega ka vool nõrgeneb.

See generaator on tänapäeval kasutusel elektrikeevitamisel, kaarleeklampide toitmisel, võimsatel ekskavaatoritel jne.

Ergutusahelate voolu muutmise teel on võimalik saada iga soovitava kujuga väliskarakteristikut. Näiteks ekskavaatori kopa mootori toitmisel tuleb arvestada seda, et mõnikord pinnase suure takistuse tõttu kopp jääb kinni ning mootor osutub lühises olevaks. Kolme ergutusmähisega generaatori väliskarakteristiku võime aga sobitada ka niisugusele juhule, muutes võõrergutusmähise voolu I_1.

TRANSFORMAATORID

XI PEATÜKK

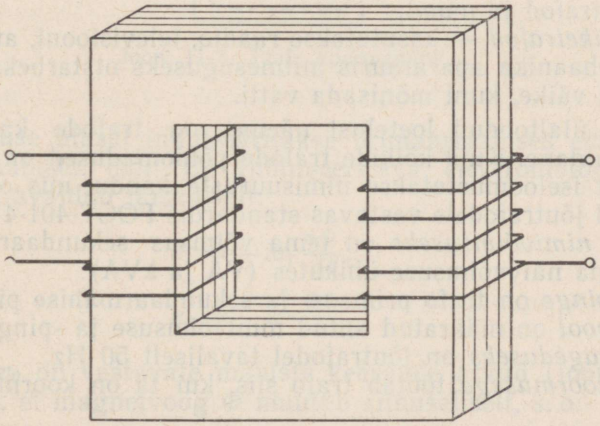
TRANSFORMAATORITE TÖÖTAMISPÕHIMÕTE JA EHITUS

11-1. PÕHIMÕISTED

Transformaator on elektromagnetiline seadis, mis on ette nähtud mingi pingega vahelduvvoolu muundamiseks teistsuguse pingega vahelduvvooluks sama sageduse juures.

Transformaator, ehk lühemalt trafo, on tänapäeva elektrienergia ülekande- ja jaotusseadmete üheks tähtsamaks lüliks.

Trafo koosneb üksteisest isoleeritud terasplekkidest koostatud kinnisest *südamikust* ning sellele asetatud ja omavahel südamikust isoleeritud kahest või mitmest *mähisest.* Joonisel 11-1 on toodud trafo skemaatiline ehitus.



Joon. 11-1. Trafo skemaatiline ehitus

Südamiku osi, millele on asetatud mähised, nimetatakse *sammasteks,* väljaspool mähiseid olevaid osi aga *ikkeiks.* Mähiste arvu järgi liigitatakse trafod kahe, kolme või mitme mähisega trafodeks. Levinumaks tüübiks on kahe mähisega trafo.

Vahelduvvoolu liigi järgi eristatakse ühe-, kolme- või mitmefaasilisi trafosid.

Ühte trafo mähistest toidetakse mingi pinge ja sagedusega vahelduvvoolu allikast. Seda mähist nimetatakse *primaarmähiseks*. Ülejäänud mähiseid, millest saadakse sama sagedusega, kuid teistsuguse pingega vahelduvvoolu, nimetatakse vastavalt *sekundaarmähisteks*.

Üldjuhul sekundaarmähise pinge ei võrdu primaarmähise omaga. Kui sekundaarpinge on madalam, nimetatakse trafot pinget madaldavaks, vastasel korral aga pinget tõstvaks.

Seda mähistest, mille pinge on madalam, nimetatakse *alampingemähiseks*, kõrgema pingega mähist — *ülempingemähiseks*.

Trafos tekkivate kadude ärajuhtimiseks peab teda jahutama. Jahutusvahendina kasutatakse õhku või õli. Esimesel juhul on tegemist õhkjahutusega trafoga. Teisel juhul asetatakse kogu trafo erilise õliga täidetud anumasse ja nimetatakse õlijahutusega trafoks.

Kasutamise otstarbe järgi liigitatakse trafod:

1) *võimsustrafod (jõutrafod)* — kasutatakse elektrijaamades toodetava elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks. Nende võimsus on tavaliselt suur, ulatudes kuni 180 MVA;

2) *mõõtetrafod* — kasutatakse koos mõõteriistadega vahelduvvooluahelates mõõtmisel;

3) eriotstarbelised trafod — keevitus-, elektriahju, elavhõbealaldaja trafod ja muud;

4) *väiketrafod* — kasutatakse raadio, televisiooni, automaatika ja telemehaanika aparatuuris mitmesuguseks otstarbeks. Võimsus tavaliselt väike, kuni mõnisada vatti.

Nagu ülaltoodud loetelust näeme, on trafode kasutamisala väga laialdane. Kuid kõikide trafode põhiomadused on samad.

Trafot iseloomustatakse nimisuuruste kaudu, mis on kindlaks määratud jõutrafodele vastavas standardis ГОСТ 401-41.

Trafo *nimivõimsuseks* on tema võimsus sekundaarklemmidel, avaldatuna näivvõimsuse ühikutes (VA ja kVA).

Nimipinge on trafo primaar- ja sekundaarmähise pinge.

Nimivool on määratud antud nimivõimsuse ja -pingega.

Nimisageduseks on jõutrafodel tavaliselt 50 Hz.

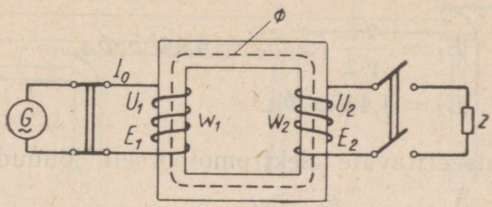
Nimikoormusega töötab trafo siis, kui ta on koormatud nimivooluga.

11-2. TRANSFORMAATORI TÖÖTAMISPÕHIMÕTE

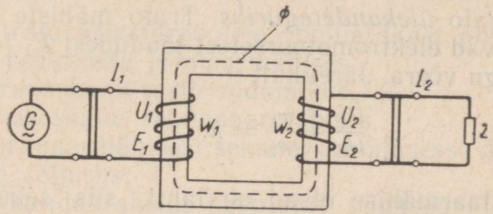
Trafot võib defineerida seadmena, milles elektrienergia kantakse ühest vooluahelast teise elektromagnetilise induktsiooni teel. Südamiku ülesandeks on vähendada trafo magnetilist takistust mõlemale mähisele ühisele magnetvoole. Sel teel võimaldub tun-

duvalt vähendada magneetimisergutust, mis on vajalik teatud magnetvoo saamiseks trafos. Ühtlasi väheneb tunduvalt ka magnetiline puiste.

Kui ühendada primaarmähis vahelduvvoolu allikaga, tekib selles mähises vool I_0. Tekkiva vahelduva magnetvälja põhiline osa läbib südamikku ja on seega praktiliselt aheldatud nii primaarkui ka sekundaarmähisega (joon. 11-2). Elektromagnetilise indukt-



Joon. 11-2. Trafo tühijooks



Joon. 11-3. Trafo koormamine

siooni seaduse alusel indutseeritakse primaarmähises emj. E_1 ja sekundaarmähises emj. E_2. Indutseeritava elektromotoorse jõu hetkväärtus avaldub järgmiselt:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$
$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \qquad (11\text{-}1)$$

kus w_1 ja w_2 on vastavate mähiste keerdude arvud (joon. 11-2).

Oletame, et magnetvoog Φ muutub siinuseliselt, s. o.

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t. \qquad (11\text{-}2)$$

Siis avalduvad elektromotoorsed jõud järgmiselt:

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -w_1 \omega \Phi_m \cos \omega t =$$
$$= +w_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90°), \qquad (11\text{-}3)$$
$$e_2 = w_2 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90°).$$

Indutseeritava emj. amplituud on seega

$$E_{1m} = w_1 \omega \Phi_m = 2\pi f w_1 \Phi_m,$$
$$E_{2m} = w_2 \omega \Phi_m = 2\pi f w_2 \Phi_m. \tag{11-4}$$

Emj. efektiivväärtuse leiame, jagades amplituudväärtused $\sqrt{2}$-ga:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4{,}44 f w_1 \Phi_m, \tag{11-5}$$
$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m.$$

Seega indutseeritavate elektromotoorsete jõudude suhe

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k. \tag{11-6}$$

Suhe k on tähtsaks trafot iseloomustavaks suuruseks ja teda nimetatakse trafo *ülekandeteguriks*. Trafo mähiste klemmipinged U_1 ja U_2 erinevad elektromotoorsetest jõududest E_1 ja E_2 väga väikese pingelangu võrra. Järelikult

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = k. \tag{11-7}$$

Kui sekundaarmähise otsad on lahti, siis sekundaarmähises voolu ei teki ja meil on tegemist trafo tühijooksuga. Primaarmähist läbiv vool I_0 on siis tühijooksuvool ja ta on vajalik peamiselt magnetvälja tekitamiseks. Kuid teatud osa elektrienergiat kulub terassüdamikus tekkiva pöörisvoolukao katmiseks ja südamiku ümbermagneetimiseks. Samuti tekib primaarmähises teda läbiva voolu mõjul soojus. Need kaod on tavaliselt väga väikesed, ja seetõttu on väike ka tühijooksuvoolu aktiivkomponent.

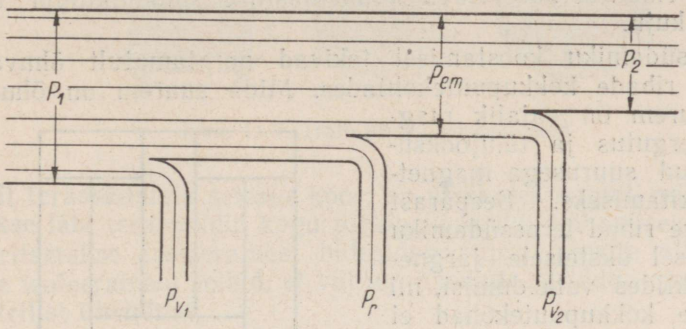
Kui sekundaarmähise külge ühendada tarbija näivtakistusega Z, siis tekib sekundaarmähises vool I_2. Energia jäävuse seaduse alusel tekib ka primaarmähises tühijooksuvoolust I_0 tugevam vool I_1. Arvestamata ülalmainitud kadusid, peab võimsus primaarpoolel võrduma võimsusega sekundaarpoolel:

$$E_1 I_1 \approx E_2 I_2,$$
$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \tag{11-8}$$

Valemist 11-8 selgub, et koormusel on voolud ligikaudu pöördvõrdelised trafo mähiste keerdude arvudega ja seega ka pingetega (vt. valem 11-7).

Energia ülekandmisel primaarmähisest sekundaarmähisesse tekivad ülalmainitud kaod. Peale selle tekib sekundaarmähises

voolu I_2 mõjul kadu eralduva soojuse näol. Trafos toimuva energia (võimsuse) muundumist näitab energeetiline diagramm (joonis 11-4),



Joon. 11-4. Trafo energeetiline diagramm

kus P_1 — trafo primaarpoolele vooluallikast antav võimsus,
P_{v1} — vaseskadu primaarmähises,
P_r — rauaskadu trafo südamikus,
P_{v2} — vaseskadu sekundaarmähises,
P_{em} — primaarmähisest sekundaarmähisesse ülekantav elektromagnetiline võimsus,
P_2 — sekundaarahelas kasutatav võimsus.

11-3. TRANSFORMAATORI EHITUS

Terassüdamik. Terassüdamikuks nimetame seda osa trafost, mida läbib trafo magnetvoog. Sõltuvalt südamikule mähiste asetamise viisist liigitatakse trafosid:

a) *südamiktüüpi* trafod, kus mähis ümbritseb südamiku sambaid,

b) *manteltüüpi* trafod, kus mähis on osaliselt ümbritsetud terassüdamikust.

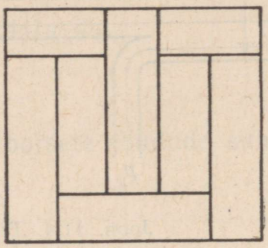
Terassüdamik koostatakse elektrotehnilisest lehtterasest (nn. trafoplekist). Trafopleki paksus on 0,35 ja 0,5 mm. Võimsustrafodes kasutatakse enamasti kuumalt valtsitud plekki mark Э41 ja Э42 või külmalt valtsitud plekki mark Э310 ja Э320.

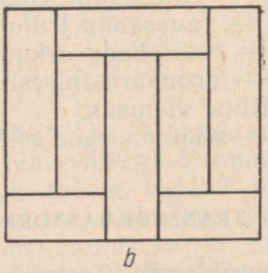
Trafopleki valmistamiseks kasutatav teras sisaldab kadude vähendamise eesmärgil lisandina räni. Niisugust lehtterast saadakse kuumalt valtsimise teel. Viimasel ajal kasutatakse veel väiksemate kadudega külmalt valtsitud lehtterast. Pöörisvoolukao vähendamiseks isoleeritakse üksikud lehed üksteisest õhukese paberi või emaillakiga.

Trafo terassüdamiku koostamiseks kasutatakse kas ühest tükist plekke või suuremate mõõtmete puhul plekiribasid. Joonisel 11-5 on näidatud ühefaasilise manteltüüpi väiketrafo pleki kuju, joonisel 11-6 aga ribadest koostatava kolmefaasilise südamiktüüpi trafo plekkide kuju.

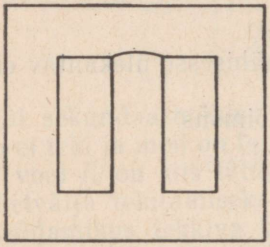
Terassüdamiku koostamisel tekivad paratamatult õhuvahed üksikute ribade kokkupuutekohtades. Mida suurem on õhupilu, seda suurem on vajalik magneetimisergutus ja tühijooksuvool antud suurusega magnetvoo tekitamiseks. Seepärast asetatakse ribad terassüdamiku koostamisel üksteisele järgnevates kihtides vaheldumisi, nii et ribade kokkupuutekohad ei ühtiks (joon. 11-6, *a* ja *b*).

Terassüdamiku sammaste ja ikke ristlõige on väikese võimsusega trafodel nelinurkne (joon. 11-7, *a*). Kuna suurema võimsusega trafode mähis asetatakse silindrilisele alusele, siis selleks, et paremini ära kasutada mähise sees olevat ruumi, tehakse samba ristlõige astmelisena (joon. 11-7, *b* ja *c*). Mida võimsam on trafo, seda suuremate mõõtmetega on südamiku ristlõige ja seda enam on astmeid. Südamiku jahtumise tõhustamiseks on suure võimsusega trafode südamikes jahutuskanalid, mis kulgevad lehtede suhtes kas piki- või ristsihis (joon. 11-8, *a* ja *b*).



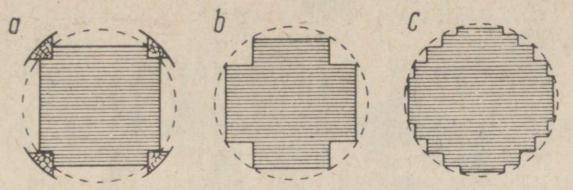


Joon. 11-6. Suurema trafo plekiribade asetus üksikutes kihtides



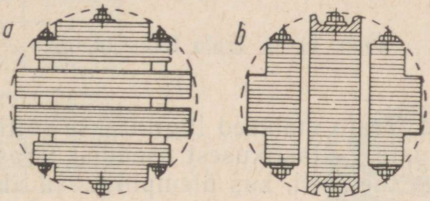
Joon. 11-5. Väiketrafo pleki kuju

Terassüdamiku ike on kas nelinurkse või sagedamini astmelise ristlõikega (joon. 11-9). Ikke ristlõike pind tehakse rauaskao ja tühijooksuvoolu vähendamise eesmärgil südamiku omast 10...15% suurem. Astmelise ristlõikega ikkes jaotub magnetvoog ühtlasemalt.



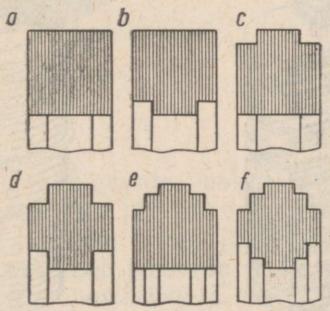
Joon. 11-7. Trafo südamike ristlõiked

Et terassüdamik seisaks koos, on plekkides augud, millest asetatakse läbi teraspoldid kogu plekipaki kokkutõmbamiseks. Poldid ümbritsetakse isoleerainest hülssidega ning mutrite alla asetatakse isoleerainest seibid, et vältida üksikute plekkide omavahelist elektrilist ühendust.



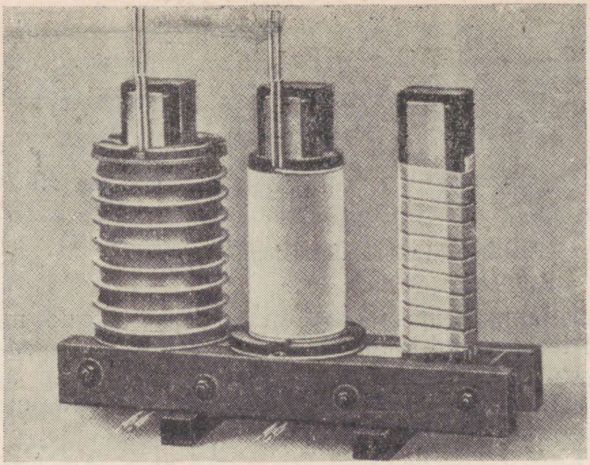
Joon. 11-8. Jahutuskanalitega trafo südamike ristlõiked

Manteltüüpi südamikke kasutatakse väiketrafodes, kuna võimsustrafod on NSV Liidus peaaegu alati südamiktüüpi.



Joon. 11-9. Ikke ristlõiked

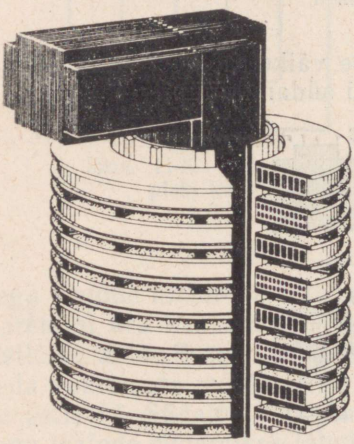
Suuremate trafode südamikud tõmmatakse kokku eriliste surveplaatidega südamikku läbivate ja isoleertoruga kaetud poltide abil. Ikked surutakse kokku puidust või profiilrauast surveplaatide abil (joon. 11-10).



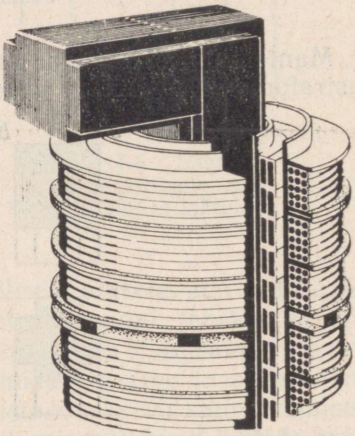
Joon. 11-10. Trafo terassüdamik

Trafo mähised. Trafo mähised liigitatakse sõltuvalt ülempinge- ja alampingemähiste vastastikusest asendist terassüdamikul:

a) *silindrilised* mähised, kus ülempinge- ja alampingemähised on asetatud südamikule kontsentriliselt (joon. 11-11);



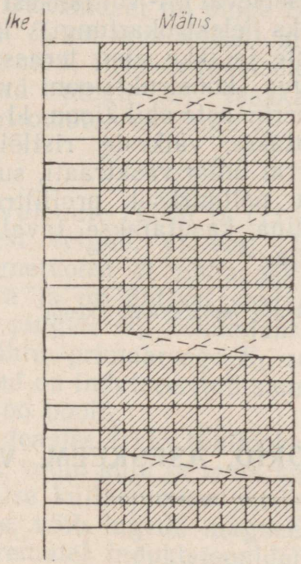
Joon. 11-11. Silindrilised mähised



Joon. 11-12. Ketasmähised

b) *ketasmähised,* kus ülempinge- ja alampingemähised koosnevad üksikutest ketastest, mis asuvad vaheldumisi piki südamikku (joon. 11-12).

Silindrilised mähised keritakse kõvapaberist torudele, kusjuures alampingemähis asetatakse südamikule lähemale. Mähiste vahele jäetakse vertikaalne 5 ... 8 mm laiune jahutuskanal. Kui keerdude arv on väike, mähitakse mähis kogu isoleertoru pikkusele ühekihilisena, suurema keerdude arvu puhul aga mitmes kihis. Kihtide vahele asetatakse 0,1 ... 0,2 mm paksune paberi ja elektrotehnilise presspapi kiht. Ülempingemähiste suure keerdude arvu tõttu jaotatakse niisugune mähis üksikuteks poolideks, kusjuures iga üksiku pooli pinge ei tohi ületada 1000 V. Suurim kihtidevaheline pinge tohib olla 100 V.



Joon. 11-13. Juhtmete transpositsioon

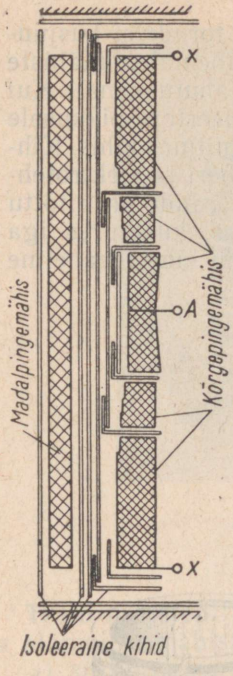


Joon. 11-14. Katkestamata spiraalmähis

Suurte võimsuste ja tugevate voolude puhul koostatakse juhe sageli mitmest paralleelsest profiiltraadist, et kergendada mähkimist. Suure juhtme ristlõike puhul jaotub vool juhtme ristlõikes ebaühtlaselt. Seepärast tuleb teostada juhet moodustavate traatide ümberpaigutamist (*transpositsiooni*), nii et üksikud keerud läheksid üle ühest kihist teise (joon. 11-13).

Ülempingemähised suure võimsusega trafodes valmistatakse katkestamatu spiraalmähisena. Mähis teostatakse nelinurkse ristlõikega profiiltraadist, mis mähitakse üksikute poolide kaupa traati katkestamata. Nii jäävad ära jootekohad poolide vahel (joon. 11-14).

Ketasmähise alampingemähise kettad asetatakse ikke lähe-



dusse (joon. 11-12). Ketasmähiste teostamine on keerukam, kuid nende paremuseks on väiksem magnetiline puiste. Ketasmähiseid kasutatakse peamiselt manteltüüpi suure võimsusega trafodes.

Mähiseid toestatakse ja hoitakse vastava konstruktsiooni abil kindlas asendis, et vältida nende nihkumist lühistel tekkivate jõudude mõjul. Väga kõrgete pingete korral (110 ja 220 kV) asetatakse ülem- ja alampingemähiste vahele mitu üksteisele järgnevat vaheldumisi asetsevat õli- või tahkest isoleerainest (näiteks elektrokartongi) kihti. Isolatsioon mähiste ja ikke ning terassüdamikku kokkusuruva konstruktsiooni vahel saavutatakse isoleerketaste abil (joon. 11-15). Juhtmena kasutatakse väikeste ristlõigete (kuni 6 mm^2) korral ümar-vasktraati, suuremate puhul aga nelinurkset profiiltraati. Traadi isolatsioonina kasutatakse tavaliselt paberit või puuvilla.

Joon. 11-15. 200-kV trafo isolatsiooni skeem

XII PEATÜKK

ÜHEFAASILISED TRANSFORMAATORID, ASESKEEM, VEKTORDIAGRAMM, PINGEMUUTUS

12-1. TRANSFORMAATORI TÜHIJOOKS

Tühijooksul sarnaneb trafo paispooliga, sest tema sekundaarmähis on vooluta. Voolu primaarmähises nimetatakse *tühijooksuvooluks* I_0, mille suurus võimsustrafode puhul on tavaliselt 3 ... 10% nimivoolust.

Tühijooksuvoolu I_0 poolt tekitatavast üldisest magnetvoost Φ_1 kulgeb suurem osa Φ terassüdamikus ja on seega aheldatud nii primaar- kui ka sekundaarmähisega. See nn. *peamagnetvoog* (ühine magnetvoog) ei ole võrdeline teda tekitava magneetimisvooluga I_μ, sest teraskehas esineb tavaliselt magnetiline küllastus.

Magneetimisvoolu all mõistame seda tühijooksuvoolu I_0 komponenti, mis on faasis vooga Φ. *Kaovool* I_a, tühijooksuvoolu teine komponent on faasis primaarmähise elektromotoorse jõuga E_1. Tavaliselt I_a on umbes 10% I_μ-st ja avaldab vähe mõju tühijooksuvoolule I_0.

Kaugelt väiksem osa üldisest magnetvoost Φ_1 ei ole aheldatud

sekundaarmähisega, vaid läbib peamiselt õhuvahet primaar- ja sekundaarmähise vahel. Seda üldise voo osa Φ_{s1} nimetatakse primaarseks *puistevooks* (joon. 12-1). Kuna puistevoog kulgeb peamiselt õhus, siis on ta praktiliselt võrdeline ja faasis teda põhjustava vooluga I_0.

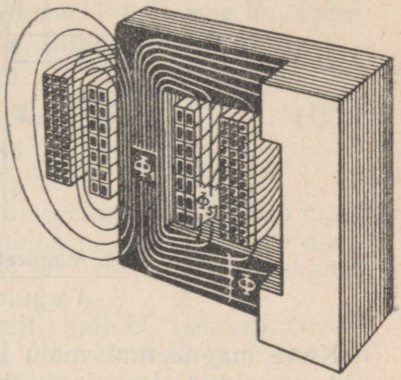
Käsitleme algul ideaalse trafo tühijooksu, s. o. jätame tühijooksuvoolu kadude komponendi I_a ning puistevoo Φ_{s1} tähele panemata.

Primaarmähises indutseeritakse emj. E_1, mis on primaarmähisele rakendatud pingele U_1 vastassuunaline (vt. valem 11-1).

Oletame, et nii pinge U_1 kui ka emj. E_1 on siinuseliselt muutuvad suurused. Primaarmähisele rakendatud pinge U_1 tasakaalustub elektromotoorse jõuga E_1:

$$U_1 = -E_1. \qquad (12\text{-}1)$$

Valemite (11-3) ja (11-2) võrdlusest selgub, et emj. E_1 jääb magnetvoost Φ maha 90° nurga võrra ja on ühtlasi vastassuunaline pingele U_1. Sekundaarne emj. E_2 ühtib primaarsega E_1, sest mõlemad on indutseeritud sama magnetvoo poolt.

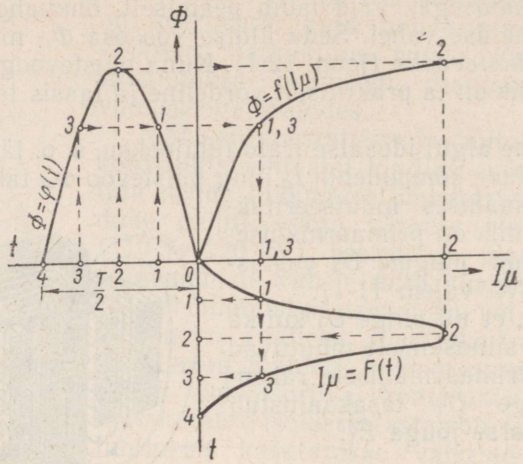


Joon. 12-1. Trafo magnetvoog tühijooksul

Ideaalse trafo tühijooksuvool on võrdne magneetimisvooluga. Selle voolu kuju ja tema amplituud sõltuvad trafo südamiku magnetilise küllastumise määrast. Kui magnetiline induktsioon on väike, võib lugeda magneetimisvoolu ja magnetvoo võrdelisteks. Suurematel induktsioonidel võrdelisus aga kaob. Trafos kasutatava terase puhul ei ole võrdelisust voo ja voolu vahel siis, kui induktsioon on suurem kui 8000 Gs (0,8 Wb/m^2).

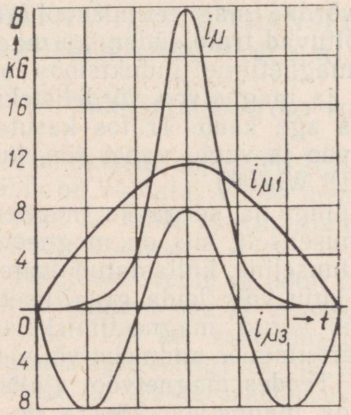
Kui primaarmähisele rakendatud pinge ja seega ka magnetvoog ning induktsioon muutuvad siinuseliselt, siis on magneetimisvool küllastamata trafos samuti siinuseline, küllastatud trafos aga mitte. Magneetimisvoolu kõvera kuju võib leida graafiliselt, nagu näidatud joonisel 12-2. Joonisel antud magneetimiskõver $\Phi = f(I_\mu)$ saadakse kas magnetahela arvutamise andmeist või olemasoleva trafo puhul katselisel teel. Teades magnetvoo ajalise muutumise iseloomu, võime joonestada magnetvoo kõvera $\Phi = f(t)$, mis antud juhul on siinuskõver. Ülalmainitud kahe kõvera abil leiame punkthaaval voolukõvera $I_\mu = f(t)$ kuju. Üksteisele vastavad punktid on kõveratel märgitud samade numbritega.

Jooniselt 12-2 on selge, et siinuseliselt muutuva magnetvoo puhul on magneetimisvool mittesiinuseline ja ta on moonutatud seda enam, mida suurem on küllastus.

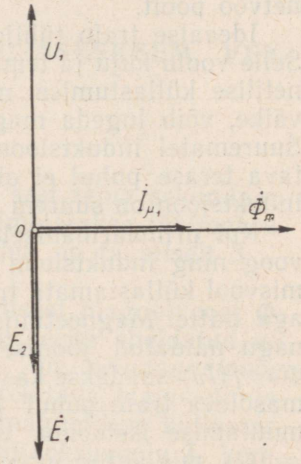


Joon. 12-2. Magneetimisvoolu kõvera kuju määramine

Kuna magneetimisvoolu kõver on sümmeetriline abstsisstelje suhtes, omab ta seega ainult paarituarvulisi harmoonilisi (s. o. kolmanda, viienda, seitsmenda jne.). Kõige tugevamini avaldub tavaliselt kolmas harmooniline. Joonisel 12-3 on näidatud mag-



Joon. 12-3. Magneetimisvoolu kõver ja tema harmoonilised: I_μ — magneetimisvool; I_{μ_1} — magneetimisvoolu esimene harmooniline; I_{μ_3} — magneetimisvoolu kolmas harmooniline



Joon. 12-4. Ideaalse trafo vektordiagramm tühijooksul

neetimisvoolu põhi- ja kolmas harmooniline. Tavaliselt kasutatava trafopleki ja induktsiooni $B = 14000$ Gs puhul on kolmas harmooniline umbes 30% ja viies 15% põhiharmoonilisest.

Kujutades ideaalse trafo vektordiagrammi (joon. 12-4) tühijooksul, saame sellel näidata magneetimisvoolu põhiharmoonilise I_{μ_1}, mis on väiksem tegelikust voolust I_μ (vt. joon. 12-3). Saadud diagramm ei vasta põhimõtteliselt tegelikule trafole, sest ei ole arvestatud kadusid (kaovoolu), kuigi erinevus on äärmiselt väike.

Tegelikus trafos esinevad puiste ja kaod. Puistevoog Φ_{s1} indutseerib primaarmähises samuti emj. E_{s1}, mille hetkväärtus

$$e_{s1} = -w_1 \frac{d\Phi_{s1}}{dt} = -L_{s1} \frac{di_0}{dt}, \qquad (12\text{-}2)$$

kus L_{s1} — *puisteinduktiivsus.*

Samuti kui põhimagnetvoost Φ indutseeritud emj. E_1 jääb maha voost 90° võrra, nii ka puiste elektromotoorne jõud E_{s1} jääb maha puistevoost Φ_{s1} ja seega ka voolust I_0 90° võrra. Nagu magnetvoog Φ_{s1} on ka emj. E_{s1} võrdeline vooluga I_0.

Nagu nägime ideaalse trafo puhul, pidi U_1 tasakaalustama põhimagnetvoost indutseeritud emj. E_1 (vt. valem 12-1). Eelnevast aga selgub, et tegelikus trafos lisandub eelmisele veel emj. E_{s1}. Peale selle tekib tühijooksul primaarmähises veel pingelang mähise aktiivtakistusel r_1, s. o. $I_0 r_1$, mis on faasis vooluga I_0. Vaadeldes emj. E_{s1} kui induktiivset pingelangu, toome sisse puisteinduktiivtakistuse (x_1) mõiste, kusjuures $x_1 = \omega L_{s1} = 2\pi f L_{s1}$. Seega kujuneb pingete võrrand tegeliku trafo tühijooksul komplekskujul järgmiseks:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1, \qquad (12\text{-}3)$$

ehk

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_0 (r_1 + jx_1),$$

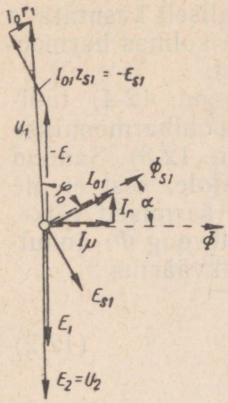
ja lõplikult

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1, \qquad (12\text{-}4)$$

kus $Z_1 = r_1 + jx_1$ — primaarmähise näivtakistus.

Pinge komponendid $j\dot{I}_0 x_1$ ja $\dot{I}_0 r_1$ on vastavalt reaktiiv- ja aktiivpingelangud trafo primaarmähises.

Kadude tõttu esineb nüüd ka kaovool I_a, mis on faasis elektromotoorse jõuga E_1, olles seega tühijooksuvoolu I_0 aktiivkomponent. Magneetimisvool on aga reaktiivkomponent, sest ta on faasis magnetvooga Φ ja 90° ees elektromotoorsest jõust E_1.



Joon. 12-5. Tegeliku trafo vektordiagramm tühijooksul

Arvesse võttes eespooltoodut ja valemeid (12-3) ning (12-4), võime kujutada tegeliku trafo vektordiagrammi tühijooksul (joon. 12-5).

Diagrammist nähtub, et tühijooksuvoolu esimene harmooniline I_{01} ja põhimagnetvoog Φ on faasis nihutatud väikese nurga α võrra, mis on tingitud terassüdamikus esinevatest kadudest. Antud diagramm toob esile ainult põhimõttelised seosed, sest joonise selguse mõttes pingelangud ja samuti tühijooksuvoolu aktiivkomponent on tugevasti moonutatud. Tegelikult on vahe emj. E_1 ja pinge U_1 vahel väiksem kui 0,5%. Samuti on kaovool I_a umbes 10% magneetimisvoolust I_μ.

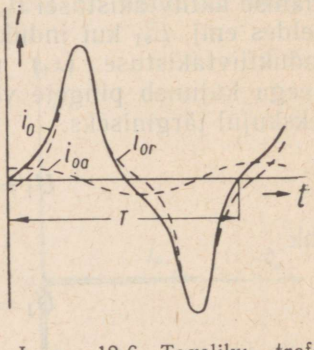
Teades võimsust tühijooksul P_0 leiame kaovoolu I_a:

$$I_a = \frac{P_0}{E_1} \approx \frac{P_0}{U_1}. \qquad (12\text{-}5)$$

Tühijooksuvõimsus $P_0 = P_r + I_0^2 r_1$,
kus P_r — rauaskadu terassüdamikus,
$I_0^2 r_1$ — vaseskadu mähises.

Tegelikult vaseskadu on tühijooksul alati väga väike (kuni 2% kogu tühijooksuvõimsusest P_0) ja see jäetakse enamasti arvestamata.

Tegelikus trafos ei ole tühijooksuvool I_0 samuti siinuseline ja tema kuju saame mittesiinuselise magneetimisvoolu I_μ ja siinuselise kaovoolu I_a liitmise teel (vt. joon. 12-6).



Joon. 12-6. Tegeliku trafo tühijooksuvoolu kõver

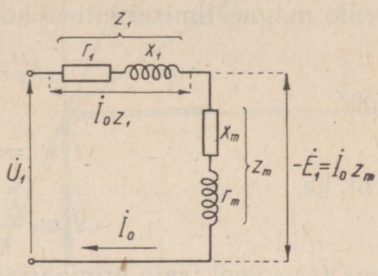
Võimsustegur tühijooksul $\cos\varphi_0$ on väga väike, sest nurk φ_0 pinge U_1 ja tühijooksuvoolu I_0 vahel erineb vähe 90°-st.

Tegelikku trafot võime eelnevat arvesse võttes kujutada ette kahe pooli järjestikkuse lülitusena. Üks poolidest ei oma terassüdamikku ja on määratud primaarmähise näivtakistusega $Z_1 = r_1 + jx_1$. Teine on paispool, mis omab terassüdamikku ja mille näivtakistus $Z_m = r_m + jx_m$. Viimases avaldises r_m on aktiivtakistus, mis võtab arvesse rauaskadu, x_m on reaktiivtakistus, mis võtab arvesse terassüdamikus kulgeva magnetvoo poolt indutseeritud elektromotoorset jõudu. Elektromotoorset jõudu $E_1 (-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m)$ võime vaadelda pingelanguna, sest pinge U_1 (nagu eespool selgitasime) tasakaalustus selle emj. E_1 (analoogiline asendus kui puiste emj. E_{s1} puhul). Siinjuures tuleb

arvesse võtta, et takistused r_m ja x_m sõltuvad magnetvoo suurusest terassüdamikus ning muutuvad koos sellega. Kuid kuna magnetvoog trafos praktiliselt jääb konstantseks, siis on eeltoodud asendus praktiliselt vastuvõetav. Eespool antud trafo pingete võrrand (12-4) kujuneb seega järgmiseks:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = + \dot{I}_0 Z_m + \\ + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (Z_1 + Z_m). \quad (12\text{-}5)$$

Saadud võrrandi ja eeltoodu põhjal võime kujutada trafot elektrilise skeemina, nn. *aseskeemina* (joon. 12-7), kus vooluahelasse on järjestikku ühendatud takistused Z_1 ja Z_m.



Joon. 12-7. Trafo aseskeem tühijooksul

Toodud aseskeemist leiame magneetimisharu näivtakistuse

$$Z_m = -\frac{E_1}{I_0}. \quad (12\text{-}6)$$

Teades rauaskaovõimsust P_r, leiame kaotakistuse

$$r_m = \frac{P_r}{I_0^2}. \quad (12\text{-}7)$$

Magneetimisharu reaktiivtakistus

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}. \quad (12\text{-}8)$$

12-2. TRANSFORMAATORI KOORMUS

Trafo koormamisel ühendatakse tema sekundaarmähise klemmidele mingi tarbija, mille takistus olgu Z. Sekundaarmähises tekib vool, mille tähistame I_2. Selgitame kõigepealt ideaalse trafo töötamise tingimusi koormusel. Nagu eespool mainitud, on ideaalses trafos $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$. Kuna võrgupinge U_1 on tavaliselt konstantne, siis ka E_1 on konstantne. Siit järeldub, et ka põhimagnetvoog Φ_m, tühijooksuvool I_0 ning tühijooksu magneetimisergutus $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 w_1$ peavad jääma igas olukorras konstantseks. Trafo koormamisel tekib sekundaarmähises vool I_2 ning vastav magneetimisergutus $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 w_2$. See magneetimisergutus püüab muuta põhimagnetvoo suurust. Kuna eeltoodu põhjal see ei ole võimalik, siis peab ka trafo primaarpoolel tekkima lisa-magneetimisergutus, mis on sama suur kui F_2, kuid sellele vastassuunaline. Seega pri-

maarne magneetimisergutus koormusel $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 w_1$ koosneb kahest komponendist: 1) $F_0 = I_0 w_1$, mis ei sõltu koormusest, ja 2) $(-F_2) = (-I_2 w_2)$, mis on koormusest sõltuv. Seega võime trafo magneetimisergutuse kohta kirjutada võrrandi

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_0 - \dot{F}_2,$$

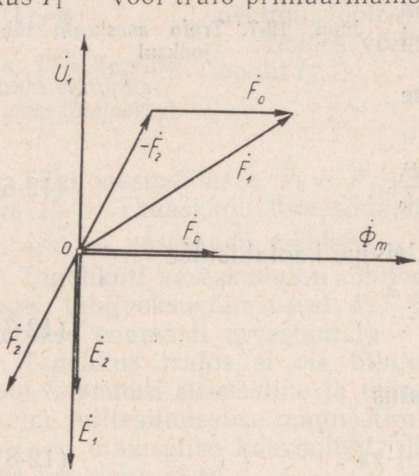
ehk

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 - \dot{I}_2 w_2, \qquad (12\text{-}9)$$

ehk ka

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1, \qquad (12\text{-}9a)$$

kus $\dot{I}_1$ — vool trafo primaarmähises koormusel.



Joon. 12-8. Ideaalse trafo magneetimisergutuste vektordiagramm

Joonisel 12-8 on toodud ideaalse trafo magneetimisergutuste vektordiagramm koormusel. Sellest diagrammist saame tuletada trafo voolude vektordiagrammi. Jagades võrrandi 12-9a mõlemad pooled w_1-ga, saame:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_0. \qquad (12\text{-}10)$$

Suurust $\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}'_2$ nimetatakse primaarmähisele *taandatud* sekundaarvooluks:

$$\dot{I}_2' = \frac{1}{k} \dot{I}_2. \qquad (12\text{-}11)$$

Seega

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0. \qquad (12\text{-}12)$$

Vastav vektordiagramm on toodud joonisel 12-9.

Taandamise all mõistame w_2 keerdu omava sekundaarmähise asendamist mähisega, mille keerdude arv w_1, ning sellele keerdude arvule vastava voolu I'_2 ja pingelangude $I_2 r'_2$ ning $I'_2 x'_2$ kasutuselevõtmist vektordiagrammides ja võrrandites. Taandamine on vajalik selleks, et suuruselt väga erinevaid primaar- ja sekundaarsuuruste vektoreid kujutada vektordiagrammis umbes sama suurtena.

Pingete taandamisel tuleb sekundaarpinget korrutada ülekandeteguriga $k = \frac{w_1}{w_2}$:

$$E'_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_1. \qquad (12\text{-}13)$$

Pingete ja voolude taandamise õigsust näitab sekundaarse näivvõimsuse suurus väljendatuna taandatud ja tegelike suuruste kaudu:

$$E'_2 I'_2 = E_2 k I_2 \frac{1}{k} = E_2 I_2.$$

Järelikult võimsus jääb samaks.

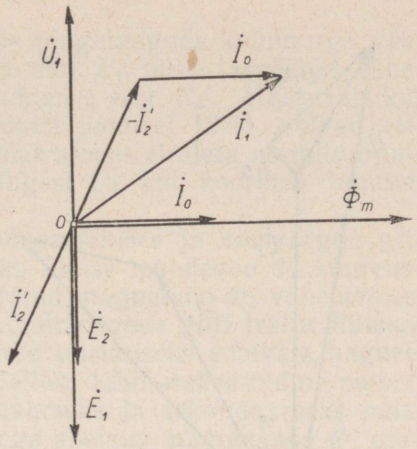
Takistuste taandamisel peab vaseskadu jääma endiseks:

$$(I'_2)^2 \cdot r'_2 = I_2^2 r_2,$$

millest

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 =$$

$$= r_2 \frac{(kI_2)^2}{I_2} = r_2 k^2. \quad (12\text{-}14)$$



Joon. 12-9. Ideaalse trafo vektordiagramm koormusel

Analoogiliselt

$$x'_2 = x_2 k^2. \quad (12\text{-}15)$$

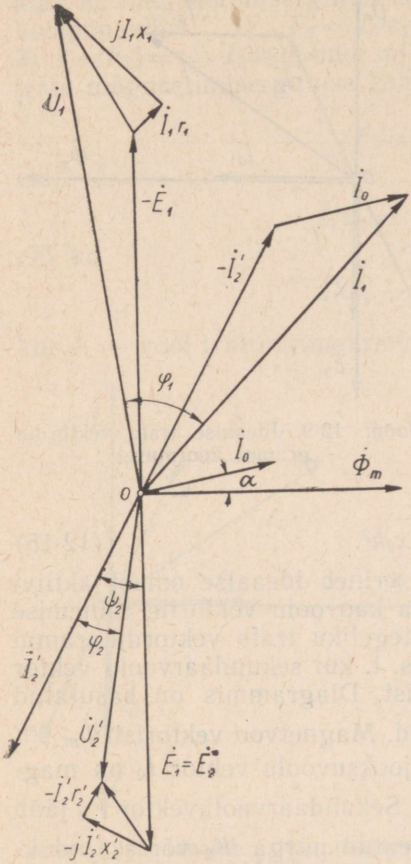
Tegeliku trafo vektordiagramm erineb ideaalse omast aktiivsete ja reaktiivsete pingelangude ja kaovoolu vektorite esinemise poolest. Joonisel 12-10 on toodud tegeliku trafo vektordiagramm induktiivse iseloomuga koormusel, s. t. kui sekundaarvoolu vektor jääb maha sekundaarpinge vektorist. Diagrammis on kasutatud sekundaarpoolele taandatud vektorid. Magnetvoo vektorist $\dot{\Phi}_m$ 90° taga on emj. vektor $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$. Tühijooksuvoolu vektor I_0 on magnetvoost ees väikese nurga α võrra. Sekundaarvooluvektor $\dot{I}'_2$ jääb elektromotoorsest jõust $\dot{E}'_2$ maha teatud nurga Ψ_2 võrra (induktiivne koormus). Et saada sekundaarpinge vektorit, tuleb geomeetriliselt liita vektorid $\dot{E}'_2$, $\dot{E}_{s2} = -\mathrm{j}\dot{I}_2 x_2$ ja $-\dot{I}'_2 r'_2$.

Pinge U_1 vektori saame, liites geomeetriliselt vektorid $-\dot{E}_1$; $\dot{I}_1 r_1$ ja $\mathrm{j}\dot{I}_1 x_1$. Primaarvoolu leiame vektorite $\dot{I}_0$ ja $-\dot{I}'_2$ liitmisel.

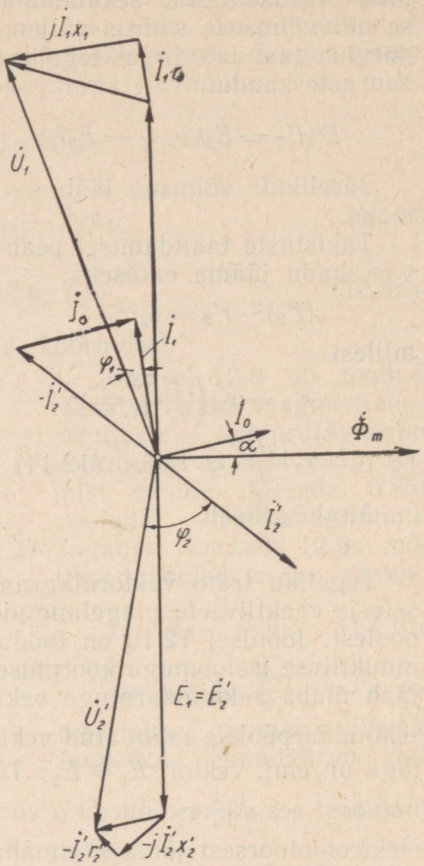
Joonisel 12-11 on antud trafo vektordiagramm mahtuvusliku iseloomuga koormusel, mis on ehitatud analoogiliselt eelmisega ega vaja seega lähemaid seletusi.

Trafo magnetvälja pilt koormusel kujuneb ligikaudu selliseks, nagu näha joonisel 12-12, *a*.

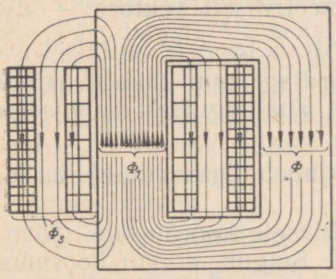
Analüüsime vektordiagrammi induktiivsele koormusele (joon. 12-9), kui $U_1 = \text{const}$ ja $\cos \varphi_2 = \text{const}$. Selgub, et kui koormus muutub tühijooksust ($\dot{I}'_2 = 0$) suuremaks, suurenevad vastavalt primaarsete pingelangude kolmnurga küljed $\dot{I}_1 r_1$ ja $\mathrm{j}\dot{I}_1 x_1$ ning



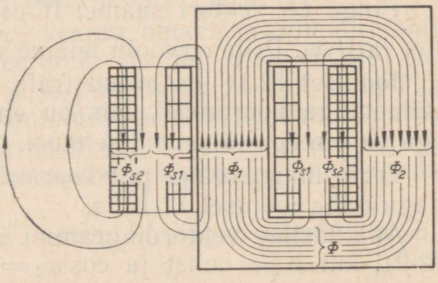
Joon. 12-10. Trafo vektordiagramm induktiivsel koormusel



Joon. 12-11. Trafo vektordiagramm mahtuvuslikul koormusel



a



b

Joon. 12-12. Koormatud trafo magnetvoog:
a — tegelik olukord; *b* — aseskeem, milles üldine puistevoog on lahutatud kaheks komponendiks Φ_{s_1} ja Φ_{s_2}

$\dot{I}_2'r_2'$ ja $\dot{I}_2'x_2'$ kui ka sekundaarsete pingelangude kolmnurga vastavad küljed. Seetõttu aga väheneb emj. E_1, mille tagajärjel väheneb ka magnetvoog Φ_m ja sekundaarne emj. E_2'. Mahtuvuslikul koormusel, nagu nähtub diagrammist joonisel 12-11, võivad eelmainitud vektorid ka suureneda. Jõutrafodes ei ületa mainitud pingelangud mõnda protsenti nimipingest U_1, kui koormus muutub kuni nimikoormuseni.

Niisiis voolu tekkimine sekundaarmähises ja samaaegne primaarvoolu tugevnemine põhjustab üldise puistevoo Φ_s suurenemise ja sekundaarmähisega aheldatud magnetvoo Φ_2 vähenemise. Niisugust suhteliselt keerukat magnetvoogude pilti trafos lihtsustatakse, et saada ülevaatlikum ja trafo uurimiseks sobivam magnetvoogude skeem (joon. 12-12, *b*). Selleks lahutatakse üldine puistevoog kaheks komponendiks: primaarseks ja sekundaarseks puistevooks Φ_{s1} ja Φ_{s2}. Primaarmähisega ahelduv magnetvoog Φ_1 osutub nüüd ühisest voost suuremaks primaarse puistevoo Φ_{s1} võrra, kuna sekundaarmähisega ahelduv magnetvoog Φ_2 on ühisest voost väiksem sekundaarse puistevoo Φ_{s2} võrra. Nii on see induktiivse iseloomuga koormusel, mahtuvusliku iseloomuga koormusel pilt muutub. Kuna tegelikult ülalmainitud magnetvood trafos liituvad, siis saame joonisel 12-12, *b* näidatud magnetvoogude pildist joonisel 12-12, *a* näidatud resulteeriva pildi. Kuigi kasutuselevõetud skeem ei vasta täielikult füüsikalisele olukorrale, võimaldab ta palju ülevaatlikumalt ja küllaldase täpsusega haarata trafos toimuvaid protsesse, nagu see juba teostuski vektordiagrammide joonestamisel.

12-3. TRANSFORMAATORI ASESKEEM

Eespool (p. 12-1) selgitasime, et trafot võime tühijooksul kujutada aseskeemina (joon. 12-7), kus ahelasse on ühendatud kaks takistust Z_1 ja Z_m. Samas vaatlesime elektromotoorset jõudu E_1 kui pingelangu ($-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m$). Primaarmähisele taandatud sekundaarmähise emj. E_2' (vt. valem 12-13) on võrdne suuruselt E_1-ga. Koormusel võib trafo sekundaarahelat kujutada kahe takistuse järjestikühendusena. Nendeks takistusteks on trafo sekundaarmähise enda näivtakistus Z_2' ning koormuse näivtakistus Z. Emj. E_2' mõjul tekib sekundaarmähises vool

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}_2'}{Z_2' + Z}. \qquad (12\text{-}16)$$

Siit järeldub, et koormusel võib trafot kujutada aseskeemina, kus tühijooksu aseskeem on täiendatud paralleelharuga takistusele $Z_2' + Z$, milles vool on I_2'. Voolu I_2' suund sekundaarahelas ühtib emj. E_2' (samuti ka E_1) suunaga. Arvesse võttes seda suunda, leiame Kirchhoffi I seaduse alusel, et

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0,$$

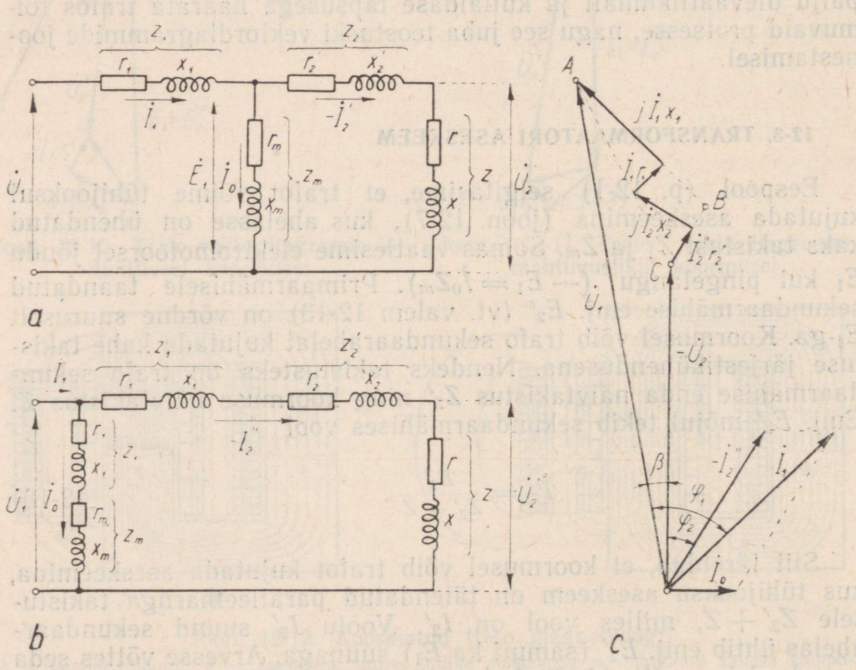
mis on sama, mida saime eespool (valemis 12-12).

Selleks, et trafot kujutavas aseskeemis toimuks voolude hargnemine nii nagu tavaliselt, näidatakse sellel sekundaarvoolu $\dot{I}_2'$ suund vastupidisena eespool mainitule ($-\dot{I}_2'$ joonisel 12-13, *a*). Saadud aseskeem leiab kasutamist igasuguste trafo tööreżiimide uurimisel.

Tihti kasutatakse nn. lihtsustatud aseskeemi, kus magneetimisharu (takistusega Z_m) on välja toodud aseskeemi klemmidele (joon. 12-13, *b*). Aseskeemis puudub nüüd eraldi primaarmähisele vastav osa ja on ainult magneetimisharu ja koormusharu. Magneetimisharusse on järjestikku ühendatud takistused Z_1 ja Z_m, mistõttu tühijooksuvoolu I_0 suurus jääb endiseks. Sekundaarvoolu $-I_2''$ suurus on aga teistsugune, sest ei ole arvestatud pingelanguga takistuses Z_1. Koormusharusse on järjestikku ühendatud takistused Z_1 ja Z_2'.

Sellele aseskeemile vastav vektordiagramm on kujutatud joonisel 12-13, *c*.

Primaar- ja sekundaarpingete vahet ehk nn. *pingemuutust* iseloomustab diagrammis näidatud kolmnurk *ABC*. Sellest diagram-



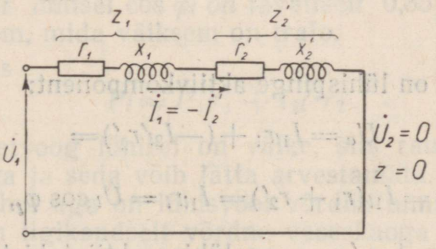
Joon. 12-13. Trafo aseskeem

mist on hea jälgida näiteks trafo sekundaarpinge muutumist, kui primaarpinge on konstantne ja koormusvoolu suurus ning iseloom ($\cos \varphi_2$) muutuvad.

12-4. TRANSFORMAATORI LÜHIS

Lühiseks nimetatakse trafo sellist olukorda, kus sekundaarmähise klemmid on omavahel kokku ühendatud tühist takistust omava juhtme abil. Lühisel on trafo sekundaarpinge $U_2 = 0$. Kui lühise teostamisel trafo primaarpinge on võrdne nimipingega, siis lühisvoolud trafo mähistes osutuvad väga suurteks (nimivoolust 20 korda ja rohkem suuremad). See on seletatav sellega, et trafo mähiste takistused on suhteliselt väikesed (võrdle pingelangude suurusi trafos). Selline lühis võib alati tekkida trafo tööolukorras. Seejuures lühise tekkimise hetkel esinevad trafos siirdenähtused, mis tunduvalt ohustavad trafot, põhjustades suuri löögitaolisi mehaanilisi jõude ja tohutu soojushulga tekkimise. Sellist lühist vaatleme allpool omaette.

Siinkohal vaatleme lühist, mis saadakse vastavates tingimustes korraldatud katse teel. Selleks pingestame primaarmähise sellise pingega $U_1 = U_l$, mille juures mähistes tekib lühisel nimivool. See nn. *lühispinge* U_l on enamasti mõni protsent (4 . . . 20%) nimipingest. Seetõttu on ka trafo peamagnetvoog ja samuti tühijooksuvool I_0 väga väikesed. Nii võib eelmises punktis toodud aseskeemi lihtsustada, jättes välja magneetimisharu takistusega Z_m ja vooluga I_0, sest koormustakistus Z on võrdne nulliga. Aseskeem kujuneb seega niisuguseks, nagu joonisel 12-14. Kuna oletasime, et tühijooksuvool on võrdne nulliga, siis $I_1 = -I_2'$.



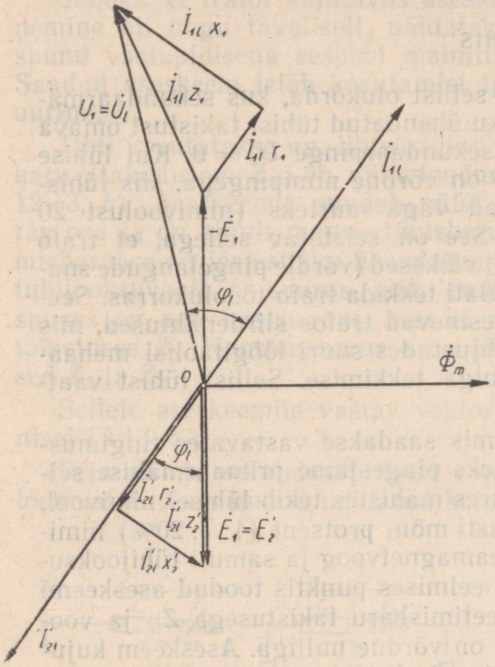
Joon. 12-14. Trafo aseskeem lühisel

Trafo vektordiagramm lühisel on näidatud joonisel 12-15.

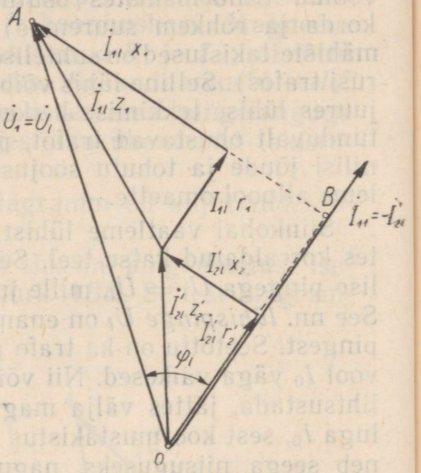
Vektordiagramm lühisel on joonestatav veel lihtsamalt, kui see on tehtud joonisel 12-15. Selleks pöörame sekundaarmähise vektorid 180° võrra nii, et $E_1 = E_2 = I_2'Z_2'$ ühtiks $-E_1$-ga. Siis saame

nn. sobitatud vektordiagrammi (joon. 12-16). Selles diagrammis võime ette kujutada täisnurkse kolmnurga OAB, mille

1) hüpotenuus AB võrdub lühispingega U_l;



Joon. 12-15. Trafo vektordiagramm lühisel



Joon. 12-16. Trafo sobitatud vektordiagramm lühisel; OAB — lühisekolmnurk

2) kaatet OB on lühispinge aktiivkomponent:

$$U_a = I_{1l}r_1 + (-I_{2l}'r_2') =$$

$$= I_{1l}(r_1 + r_2') = I_{1l}r_l = U_l \cos\varphi_l, \qquad (12\text{-}17)$$

kus $I_{1l}' = -I_{2l}'$; $r_1 + r_2' = r_l$ on lühise aktiivtakistuseks;

3) kaatet AB on lühispinge reaktiivkomponent:

$$\dot{U}_l = \dot{I}_{1l}x_1 + (-\dot{I}_2'_l x_2') = \dot{I}_{1l}(x_1 + x_2') =$$

$$= \dot{I}_{1l}x_l = \dot{U}_l \sin\varphi_l, \qquad (12\text{-}18)$$

kus x_l — lühise reaktiivtakistus.

Kolmnurka *OAB* nimetatakse lühisekolmnurgaks. Lühispinge U_l omab suurt tähtsust trafo omaduste iseloomustamisel. ГОСТ 401-41 nõudel antakse lühispinge ja tema komponendid protsentides nimipingest, kusjuures tingimuseks on, et trafo mähiste temperatuur on 75°. Seega protsentuaalne lühispinge ja tema komponendid avalduvad järgmiselt:

$$u_l = \frac{U_l}{U_{1n}} \cdot 100\%, \tag{12-19}$$

$$u_a = \frac{I_{1n} r_l}{U_{1n}} \cdot 100\%, \tag{12-20}$$

$$u_r = \frac{I_{1n} x_l}{U_{1n}} \cdot 100\%, \tag{12-21}$$

kusjuures

$$u_l = \sqrt{u^2_a + u^2_r}, \tag{12-22}$$

$$u_a = U_l \cos \varphi_l, \tag{12-23}$$

$$u_r = U_l \sin \varphi_l. \tag{12-24}$$

Lühispinge märgitakse iga võimsustrafo sildile. Tema abil on võimalik määrata trafo pingemuutus koormusel. Samuti saab lühispinge abil väga lihtsalt arvutada kestevlühisvoolu nimiprimaarpingel, sest

$$I_{1ln} = I_n \frac{100}{U_l}. \tag{12-25}$$

Linnade jaotusvõrkudes töötavates trafodes keskmiselt esineva lühispinge ($U_l = 5\%$) puhul oleks lühisvool nimipingel 20-kordse nimivoolu suurune.

Võimsustegur lühisel $\cos \varphi_l$ *on* tavaliselt 0,35 ... 0,65 piirides, olles seda suurem, mida väiksem on trafo.

Lühisvõimsus

$$P_l \approx I^2_{1l} r_1 + I_{2l}{}'^2 r_2'.$$

Kuna magnetvoog lühisel on väike, siis rauaskadu on tähtsusetu suurusega ja seda võib jätta arvestamata. Katseliselt teostatud lühise puhul aga on lühisvool võrdne nimivooluga. Seega lühisvõimsus on ligikaudselt võrdne vaseskaoga trafos nimikoormusel.

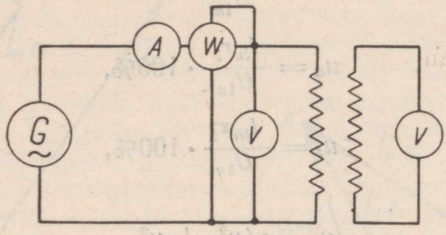
12-5. TRANSFORMAATORI PARAMEETRITE MÄÄRAMINE

Trafo olukorda mitmesugustes töörežiimides on hõlpus uurida aseskeemi alusel. Kuid selleks, et saaks kasutada aseskeemi, peavad teada olema aseskeemis esinevad suurused, esmajoones

aktiiv- ja reaktiivtakistused. Neid trafo parameetreid saab määrata kas katseliselt või arvutuse teel. Siinkohal vaatleme lähemalt esimest viisi.

Trafo parameetrite määramiseks katselisel teel tuleb teha kaks katset: tühijooksu- ja lühisekatse.

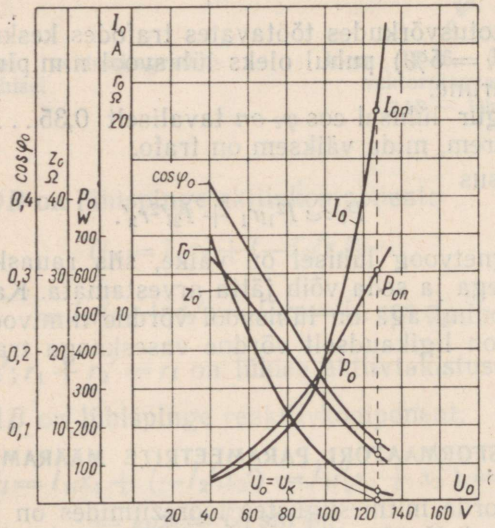
Tühijooksukatse teostamiseks koostatakse joonisel 12-17 toodud skeem. Primaarmähise pinget U_1 tõstetakse järk-järgult nul-



Joon. 12-17. Tühijooksukatse skeem

list kuni $1{,}1U_{1n}$ (U_{1n} on primaarmähise nimipinge). Rakendatav pinge peab olema seejuures siinuseline ja sagedus võrdne nimisagedusega (tavaliselt 50 Hz). Nagu näha skeemilt, on primaarpoolele lülitatud ampermeeter, voltmeeter ja vattmeeter, sekundaarpoolele ainult voltmeeter.

Tühijooksukatse andmete alusel joonestatakse graafiliselt tühi-



Joon. 12-18. Tühijooksukarakteristikud

jooksukarakteristikud, s. o. järgmiste funktsioonide graafikud: $I_0 = f(U_1)$; $P_0 = f(U_1)$ ja $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ (joon. 12-18).

Tühijooksukatse andmeil saab arvutada järgmised suurused.

1. Ülekandetegur $k \approx \frac{U_1}{U_2}$.

2. Suhteline tühijooksuvool $i_0 = \frac{I_1}{I_1} \cdot 100\%$, protsentides nimivoolust. Tavaliselt on see 3...8% suurune, kusjuures suuremad väärtused vastavad väiksemale võimsusele.

3. Magneetimisharu näivtakistus ja tema komponendid.

Kuna $Z_1 \ll Z_m$, siis võib küllaldase täpsusega kirjutada:

$$Z_m \approx \frac{U_0}{I_0},$$

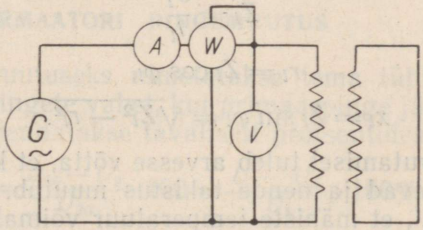
$$r_m = Z_m \cos \varphi_0,$$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} = Z_m \sin \varphi_0.$$

4. Tühijooksukaod $P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$. Nagu aseskeemist (joon. 12-7) näha, läbib vool tühijooksul näivtakistusi Z_1 ja Z_m. Seega tühijooksuvõimsus on avaldatav ka teisiti: $P_0 = I_0^2 (r_1 + r_m)$. Kuna aga $r_m \gg r_1$, siis võime lugeda tühijooksuvõimsuse peaaegu võrdseks rauaskaovõimsusega:

$$P_0 \approx I_0^2 r_m = P_r.$$

Tühijooksukarakteristikutest näeme, et tühijooksuvool I_0 ja -võimsus P_0 pinge tõstmisel kasvavad, sest rauaskadu suureneb võrdeliselt pinge ruuduga (U^2). Võimsustegur $\cos \varphi_0$ väheneb pinge tõusmisel rauaskao suurenemise tõttu.

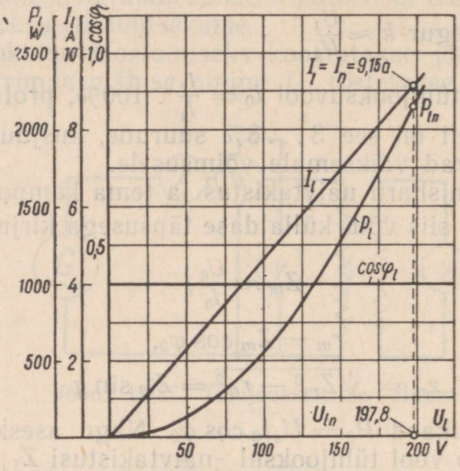


Joon. 12-19. Lühisekatse skeem

Lühisekatse teostatakse joonisel 12-19 antud skeemi alusel.

Lühisekatsel ühendatakse trafo ühe mähise klemmid omavahel kokku ning suurendatakse teise mähise pinget nullist sellise väärtuseni, mille juures trafo mähises tekib nimivoolu suurune lühisvool.

Lühisekatse andmeil joonestatakse lühisekarakteristikud: $I_l = f(U_l)$, $P_l = f(U_l)$ ja $\cos\varphi_l = f(U_l)$ (joon. 12-20).



Joon. 12-20. Lühisekarakteristikud

Lühisel takistused x_l ja r_l ei olene voolust ega pingest, mistõttu lühisvoolu I_l väljendav joon on sirge. Võimsustegur lühisel jääb samuti praktiliselt konstantseks.

Peale selle saab lühisekatse andmeist arvutada järgmised suurused.

1. Lühistakistus $Z_l = r_l + jx_l$,

$$Z_l = \frac{U_l}{I_l},$$

$$r_l = Z_l \cos\varphi_l,$$

$$x_l = Z_l \sin\varphi_l = \sqrt{Z_l^2 - r_l^2}.$$

Takistuste arvutamisel tuleb arvesse võtta, et katse kestel trafo mähised kuumenevad ja nende takistus muutub. Seepärast tuleb katse teostada nii, et mähiste temperatuur võimalikult vähe muutuks. Selleks alustatakse katset suurimast pingest, kusjuures trafo lülitatakse võrku ainult nii kauaks, kui on teostatud mõõteriistade näitude lugemised.

Standardi nõudel tuleb takistus taandada temperatuurile 75°. Teatavasti koosneb aktiivtakistus vahelduvvoolu puhul kahest osast: $r_a = r + \Delta r$, kus r on juhtme materjalist ja mõõtmetest sõltuv takistus ja Δr on pöörisvooludest põhjustatud takistuse näiv suurenemine.

ГОСТ 9484-46 alusel arvutatakse tavaliselt trafo lühistakistus temperatuurile 75° valemiga:

$$r_{l75°} = r_{l\vartheta}\,\xi, \qquad (12\text{-}26)$$

kus $\xi = \frac{310}{235 + \vartheta}$ — tegur, mis võtab arvesse, et kaod on pöördvõrdelised eritakistusega,

ϑ — mähise temperatuur katsel.

Induktiivne lühistakistus x_l temperatuurist ei sõltu.

Tuleb võtta arvesse, et $r_l = r_1 + r_2$ ja $x_l = x_1 + x_2$ (vt. p. 12-4). Takistused r_1 ja r_2 on eraldi teatud täpsusega kergesti määratavad, kuid x_1 ja x_2 eraldi leidmine on seotud suurte raskustega ega anna kuigi täpseid tulemusi. Enamasti seda aga vaja ei olegi, sest lihtsustatud aseskeemis (joon. 12-13, *a*) esinevad takistused r_l ja x_l. Küllaldase täpsusega võib ka võtta, et

$$x_1 = x_2' = 0{,}5x_l.$$

2. Lühiskaod $P_l = U_l I_{1n} \cos\varphi_l = I_l^2 r_l$ koosnevad vaseskaost mähistes ja rauaskaost terassüdamikus. Kuna aga lühisekatsel on magnetvoog väga väike, siis ka rauaskadu on tähtsusetu suurusega. Seepärast on lühiskaod praktiliselt võrdsed vaseskaoga. Ka lühiskaod tuleb taandada temperatuurile 75°.

3. Lühispinge $U_l = \frac{U_l}{U_{1n}} \cdot 100\%$ leitakse nimivoolule võrdse lühisvoolu juures mõõdetud lühispinge järgi ja taandatakse temperatuurile 75°. Leitud U_l järgi leiame ka lühispinge komponendid $U_a = U_l \cos\varphi_l$ ja $U_r = U_l \sin\varphi_l = \sqrt{U_l^2 - U_a^2}$.

12-6. TRANSFORMAATORI PINGEMUUTUS

Trafo pingemuutuseks nimetatakse tema tühijooksu ja koormuse sekundaarpingete vahet, kui primaarpinge jääb konstantseks. Pingemuutus väljendatakse tavaliselt protsentides nimipingest:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} \cdot 100\%. \qquad (12\text{-}27)$$

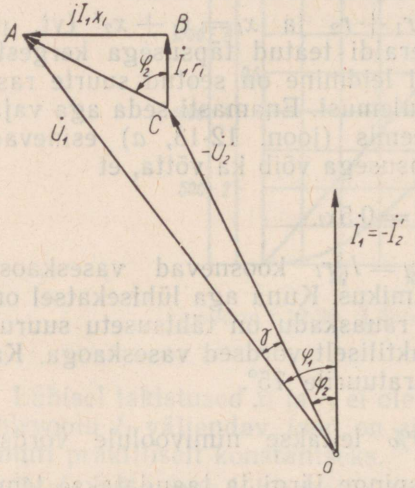
Pingemuutuse selgitamisel lähtume trafo lihtsustatud vektordiagrammist joonisel 12-13, *b*. Seejuures teeme ülevaatlikkuse mõttes veel ühe lihtsustuse. Jätame nimelt arvestamata suhteliselt väikese tühijooksuvoolu I_0 (3 . . . 8% I_{1n}-ist). Sellega ei teki pingelangude osas kuigi suur viga. Seega joonisel 12-13, *b* esitatud vektordiagramm kujuneb joonisel 12-21 esitatuks. Diagrammil näidatud pingelangude kolmnurk *ABC* on ülemäära suur, kuna tegelikult tema külgede suurus on ainult mõni protsent kogu-

pingest. Olgu joonisel 12-21 antud diagramm vastav nimikoormusele, siis kolmnurk ABC on lühisekolmnurk (vrd. joon. 12-16) ja tema küljed vastavalt:

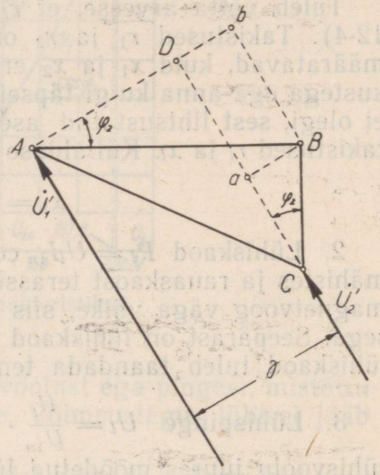
$\overline{AC}$ — U_l — lühispinge,

$\overline{BC}$ — U_a — aktiivne lühispinge komponent,

$\overline{AB}$ — U_r — reaktiivne lühispinge komponent.



Joon. 12-21. Trafo lihtsustatud vektordiagramm induktiivse koormuse korral



Joon. 12-22. ΔU määramine

Pingemuutuse määramiseks kasutame kolmnurka ABC. Selleks tõmbame ristjoone $\overline{AD}$ vektori U_2' pikendusele (joon. 12-22).

Peale selle tõmbame ristjoone $\overline{Ba}$ punktist B U_2' pikendusele ning samast punktist ristjoone $\overline{AD}$ pikendusele $\overline{Bb}$.

Valemi (12-21) alusel:

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2'}{U_1} \cdot 100,$$

millest $\frac{U_2'}{U_1} = 1 - \frac{\Delta U}{100}$.

Diagrammist (joon. 12-22) leiame:

$$\cos\gamma = \frac{U_2' + \overline{DC}}{U_1} = \frac{U_2'}{U_1} + \frac{\overline{DC}}{U_1} = 1 - \frac{\Delta U}{100} + \frac{\overline{DC}}{U_1} = \sqrt{1 - \sin^2\gamma} \approx$$

$$\approx 1 - \frac{\sin^2\gamma}{2} = 1 - \frac{(\overline{AD})^2}{2U_1^2},$$

sest kuna γ on väike nurk (2—3°), siis $\sqrt{1-\sin^2\gamma} \approx 1 - \frac{\sin^2\gamma}{2}$ ning diagrammist $\sin\gamma = \frac{\overline{AD}}{U_1}$.

Saadud võrdusest

$$1 - \frac{\Delta U}{100} + \frac{\overline{DC}}{U_1} = 1 - \frac{(\overline{AD})^2}{2U_1^2}$$

leiame ΔU:

$$\Delta U = \left[\frac{\overline{DC}}{U_1} + \frac{(\overline{AD})^2}{2U_1^2}\right] \cdot 100.$$

Teiselt poolt leiame diagrammist (oletades, et $\varphi_1 \approx \varphi_2$):

$$\overline{DC} = U_a \cos\varphi_2 + U_r \sin\varphi_2,$$
$$AD = U_r \cos\varphi_2 - U_a \sin\varphi_2.$$

Asetades need avaldised eespool saadud ΔU valemitesse ning korrutades kõiki liikmeid 100-ga, saame:

$$\Delta U = \left[\frac{U_a}{U_1}\cos\varphi_2 + \frac{U_r}{U_1}\sin\varphi_2 + \frac{\left(\frac{U_r}{U_1}\cos\varphi_2 - \frac{U_a}{U_1}\sin\varphi_2\right)^2}{2}\right] 100 =$$

$$= U_a \cos\varphi_2 + U_r \sin\varphi_2 + \frac{(U_r\cos\varphi_2 - U_a\sin\varphi)^2}{200}. \qquad (12\text{-}28)$$

Leitud avaldis annab võimaluse väga täpselt arvutada pingemuutust ΔU. Enamasti võib jätta avaldisest välja kolmanda murrulise liikme kui väga väikese suuruse ning kasutada valemit järgmisel kujul:

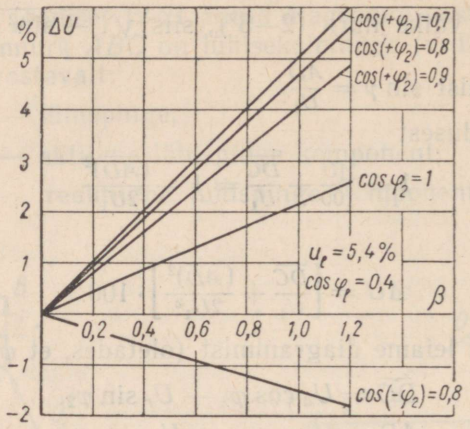
$$\Delta U = U_a \cos\varphi_2 + U_r \sin\varphi_2. \qquad (12\text{-}28a)$$

Leitud valemid pingemuutuse ΔU kohta on kehtivad nimikoormusel. Kui koormus erineb nimikoormusest, tuleb korrutada üksikuid avaldise liikmeid koormusteguriga $\beta = \frac{I_2'}{I'_{2n}}$, kus I_2' — koormusvool antud juhul ja I'_{2n} — nimisekundaarvool. Valem (12-28) omandab siis kuju:

$$\Delta U = \beta(U_a \cos\varphi_2 + U_r \sin\varphi_2) + \frac{\beta^2 (U_r\cos\varphi_2 - U_a\sin\varphi_2)^2}{200}. \qquad (12\text{-}28b)$$

Nagu nähtub viimasest valemist, sõltub pingemuutus trafos konstantse primaarpinge puhul koormuse suurusest ja iseloomust. Selle sõltuvuse graafilist kujutust nimetatakse trafo väliskarakteristikuks (joon. 12-23). Pingemuutus trafos on väike, umbes 2 . . . 4% suurune.

Mahtuvuslikul koormusel muutub pingemuutus negatiivseks ning pinge koormuse suurenemisel tõuseb.



Joon. 12-23. Trafo väliskarakteristikud

12-7. TRANSFORMAATORI KAOD JA KASUTEGUR

Trafo kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}. \qquad (12\text{-}29)$$

Trafo kasutegur on väga kõrge, eriti tänapäeva võimsustrafodel, ulatudes kuni 99%-ni ja rohkemgi. Seepärast kasuteguri määramine vahetult sekundaar- ja primaarvõimsuste alusel annab väga väikese täpsuse. Trafo kasuteguri määramisel avaldatakse seetõttu üks nimetatud võimsustest teise ja kadude kaudu.

Standardi kohaselt määratakse kasutegur sekundaarse nimiväivõimsuse P_{2n} ning tühijooksu- ja lühisekadude P_0 ja P_l alusel:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_l}{\beta P_{2n} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_l}, \qquad (12\text{-}30)$$

kus $\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$ — koormustegur.

Selles valemis on tehtud rida lihtsustusi, mis aga tulemusele kuigi suurt mõju ei avalda. On jäetud arvesse võtmata trafo rauaskao muutumine koormuse muutumisel.

Valemis esinev sekundaarne näivvõimsus on võrdne nimipinge ja nimivoolu korrutisega:

$$P_{2n} = U_{2n} I_{2n}.$$

Tegelikult koormusel sekundaarpinge ja seega ka tegelik sekun-

daarvõimsus muutuvad. Nagu selgus eelmises punktis, ei ole see muutus siiski kuigi suur.

Nagu eespool mainisime, on tühijooksuvõimsus P_0 ligikaudu võrdne rauskaoga. Kuid nagu nähtub trafo vektordiagrammist koormusel (joon. 12-10 ja 12-11), muutub emj. E_1 koormuse muutudes. Seega aga muutub ka magnetvoog ja rauaskadu. Induktiivsel koormusel on rauaskadu järelikult väiksem (mahtuvuslikul koormusel vahel ka suurem) kui tühijooksul. Kuna aga tegelikult need muutused on tähtsusetud (3...8%), siis võib oletada, et $P_0 = \text{const}$.

Nagu teada, on lühisvõimsus P_l ligikaudu võrdne mähiste vaseskaoga. Tegelikult aga tekib ka siin viga, sest tühijooksuvoolu I_0 suurus konstantse sekundaarvoolu $\dot{I}_2'$ puhul muutub, muutes seega ka primaarvoolu suurust $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'$. Seega vaseskadu induktiivsel koormusel osutub veidi suuremaks, mahtuvuslikul aga väiksemaks, kui lühisel. Kuid ka see viga on äärmiselt väike ning ei avalda olulist mõju kasuteguri väärtusele.

Kasuteguri avaldisest võime leida maksimaalsele kasutegurile vastava koormusteguri β (kui võtta avaldisest (12-30) esimene tuletis β järgi $\frac{d\eta}{d\beta}$ ning võrdsustada see nulliga):

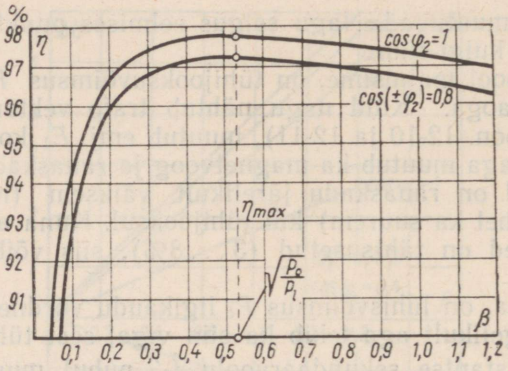
$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_l}}; \qquad (12\text{-}31)$$

Siit järeldub, et kasutegur on maksimaalne siis, kui rauaskadu võrdub vaseskaoga, sest siis $\beta = 1$.

Tänapäeva võimsustrafodes on suhe $\frac{P_0}{P_l} = \frac{1}{3} \ldots \frac{1}{4}$, mis on tingitud trafo ekspluateerimise tingimustest. Kuna rauaskadu P_0 on konstantne ja esineb alati, vaseskadu aga sõltub koormusest, siis on kasulik suurendada vaseskadu. Vaseskao suurendamine on otstarbekas siis, kui trafod tihti pikemat aega töötavad väiksema koormusega (näiteks linna jaotusvõrkude trafod suvel). Lähtudes eeltoodud β väärtusest selgub, et maksimaalne kasutegur esineb koormusteguri $\beta = 0{,}58 \ldots 0{,}5$ väärtuse juures. Kasuteguri iseloomulik kõver on antud joonisel 12-24. Kui trafo töötab muutuval koormusel, siis kasutatakse sellise töötamisviisi hindamiseks aastast kasutegurit η_a. Kasutegur η_a on võrdne sekundaarahelasse aasta jooksul antud energiahulga ja primaarvõrgust samal ajavahemikul saadud energiahulga suhtega:

$$\eta_a = 1 - \frac{8760\,P_0 + \beta^2 P_l T_k}{\beta P_{2n} \cos\varphi_2 T_k + 8760\,P_0 + \beta^2 P_l T_k},$$

kus T_k — trafo nimivõimsuse P_{2n} kasutamise aeg aastas, 8760 — tundide arv aastas.



Joon. 12-24. Trafo kasuteguri kõverad

Aastane kasutegur on väiksem ülaltoodud kasutegurist. Mida suurem on aastane kasutegur, seda majanduslikumalt kasutatakse trafot.

XIII PEATÜKK

KOLMEFAASILISED TRANSFORMAATORID

13-1. KOLMEFAASILISE VOOLU TRANSFORMEERIMINE

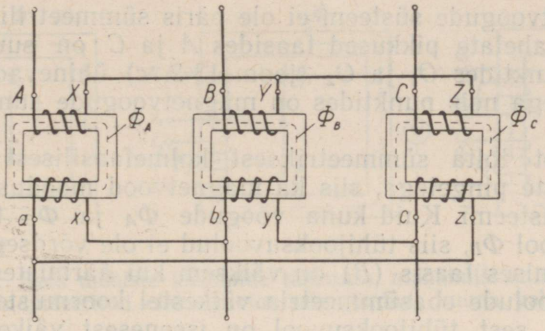
Kolmefaasilise voolu transformeerimine võib toimuda:

1) ühefaasiliste, igasse faasi eraldi ühendatud trafode ja

2) kolmefaasiliste, kõikidele faasimähistele ühise terassüdamikuga trafode abil. Kolmefaasiliste trafode südamike plekid on näidatud joonisel 11-6.

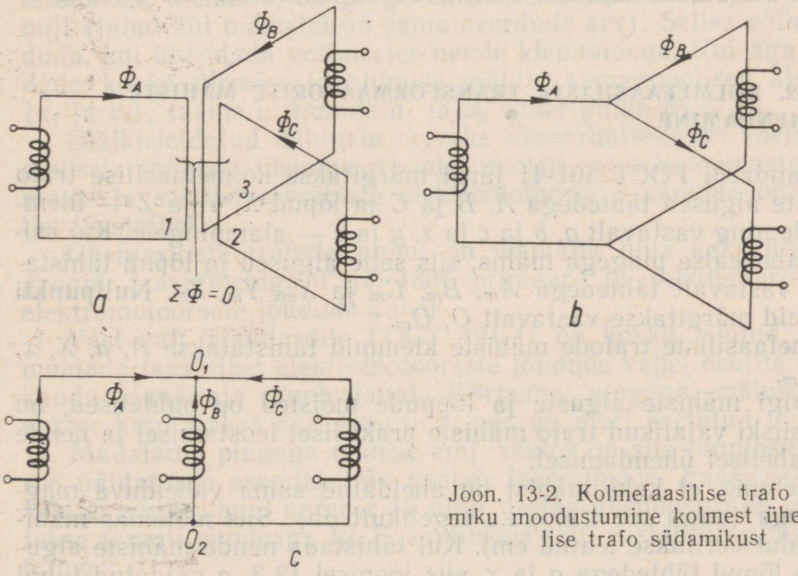
Kolme ühefaasilise trafo kasutamisel asub iga faasi magnetahel omaette ega ole teistega magnetiliselt seotud. Kolmefaasilise trafode rühma mähised on aga üksteisega elektrilises ühenduses, moodustades vastavalt kolmefaasilise süsteemi kas kolmnurk- või tähtühenduses. Joon. 13-1 on näha selline kolmefaasiline ühefaasiliste trafode rühm, mille mähised on ühendatud täht-kolmnurka. Selline kolmefaasilise voolu transformeerimise viis leiab mõnikord kasutamist, sest tal on mõningaid eeliseid: võimalus avarii korral töötada ka kahe trafoga, üksikute trafode väiksem kaal ja gabariit suurte võimsuste puhul. Kuid puuduseks on siin suurem ruumivajadus, samuti keerukam ja raskem ekspluatatsioon ja mõningad teised asjaolud. Seepärast kasutatakse enamasti kolmefaasilisi trafosid.

Kolmefaasilise trafo magnetahela kuju saab selgitada joonisel 13-2 antud skeemi abil. Kui asetada kolm ühefaasilist trafot, mis



Joon. 13-1. Kolmefaasiline trafode rühm mähiste ühendusega täht-kolmnurka

kuuluvad samasse kolmefaasilisse süsteemi, nii nagu näha joonisel 13-2, *a*, siis võib sambad *1, 2, 3* asendada ühe ühise sambaga. Seda ühist sammast läbib kolme faasi magnetvoogude summa, mis on aga võrdne nulliga: $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$. Seega võib keskmise samba lihtsalt ära jätta (joon. 13-2, *b*).



Joon. 13-2. Kolmefaasilise trafo südamiku moodustumine kolmest ühefaasilise trafo südamikust

Kui nüüd vähendada faasi *B* magnetahela ikkeid, siis saame joon. 13-2, *c* näidatud ühes tasapinnas asuva kolmefaasilise trafo südamiku. Selline südamik võeti kasutusele 1881. a. M. O. Dolivo-Dobrovolski poolt ja on tänapäeval kõige enam levinud. Sellise

trafo magnetvoogude süsteem ei ole päris sümmeetriline. Tõepoolest, magnetahelate pikkused faasides A ja C on suuremad kui faasis B. Punktides O_1 ja O_2 (joon. 13-2, *c*) ühinevad kõik kolm voogu ja seega neis punktides on magnetvoogude summa võrdne nulliga.

Kui trafot toita sümmeetrilisest kolmefaasilisest süsteemist sümmeetriliste pingetega, siis ka magnetvood moodustavad sümmeetrilise süsteemi. Kuid kuna voogude Φ_A ja Φ_C teekond on pikem kui vool Φ_B, siis tühijooksuvoolud ei ole võrdsed. Tühijooksuvool keskmises faasis (B) on väiksem kui äärmistes (A ja C). Tühijooksuvoolude ebasümmeetria väikestel koormustel ei avalda erilist mõju, sest tühijooksuvool on iseenesest väike. Vastavalt standardile loetakse kolmefaasilise trafo tühijooksuvoolu faasi väärtuseks kolme faasi keskmist. Tuleb mainida, et tänapäeva kolmefaasilistes trafodes magnetiline ebasümmeetrilisus on väike, sest ikke ristlõikepind tehakse tavaliselt 10 ... 15% suurem südamike ristlõikepinnast.

Eelmises peatükis toodud seosed on kasutatavad ka kolmefaasilise trafo iga faasi kohta. Kuigi kolmefaasilises südamik-tüüpi trafos on üksikute faaside magnetahelad üksteisega seotud (seega mõjutavad üksteist), on siiski ühefaasilise trafo kohta esitatud seosed küllaldase täpsusega kehtivad ka kolmefaasilise trafo igale faasile.

13-2. KOLMEFAASILISTE TRANSFORMAATORITE MÄHISTE ÜHENDAMINE

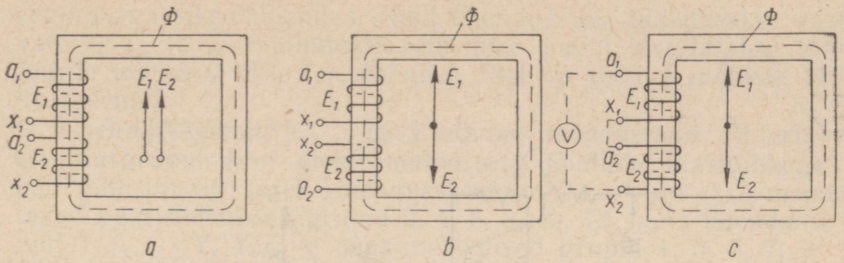
Standardi ГОСТ 401-41 järgi märgitakse kolmefaasilise trafo mähiste algused tähtedega A, B ja C ja lõpud X, Y ja Z — ülempingele ning vastavalt a, b ja c ja x, y ja z — alampingele. Kui esineb vahepealse pingega mähis, siis selle algused ja lõpud tähistatakse vastavalt tähtedega A_m, B_m, C_m ja X_m, Y_m, Z_m. Nullpunkti klemmid märgitakse vastavalt O, O_m.

Ühefaasiliste trafode mähiste klemmid tähistatakse A, a, X, x, A_m, X_m.

Kuigi mähiste alguste ja lõppude mõisted on suhtelised, on need siiski vajalikud trafo mähiste praktilisel teostamisel ja nende omavahelisel ühendamisel.

Oletame, et kaks mähist on aheldatud sama vahelduva magnetvooga (nagu see trafos ka tegelikult on). Siis mõlemas mähises indutseeritakse teatud emj. Kui tähistada nende mähiste algused ja lõpud tähtedega a ja x, siis joonisel 13-3, a näidatud juhul tuleb lugeda neis mähistes indutseeritud elektromotoorsed jõud faasis olevaiks, sest nad on mistahes hetkel ühesuguse suunaga (kas algusest a lõpu x poole või vastupidi). Joonisel 13-3, a näidatud mähised on südamikule mähitud samas suunas.

Kui vahetada ühe mähise klemmide tähised (joon. 13-3, *b*),



Joon. 13-3. Seos mähiste klemmide tähistuse, mähkimissuuna ja mähises indutseeritud elektromotoorsete jõudude suuna vahel

siis tuleb lugeda elektromotoorsed jõud faasis 180° nihutatuks, kuigi füüsikaline protsess toimub endiselt. Samasugune 180° faasinihe toimub ka siis, kui mähiste tähistus jätta endiseks, kuid üks mähistest mähkida vastupidi (joon. 13-3, *c*). On kokku lepitud nimetada mähist «parempoolseks», kui keerud mähitakse parempoolse keerme kulgemise suunas, ja «vasakpoolseks», kui mähkimise suund on vastupidine.

Eeltoodust selgub, et kui ühendada joonisel 13-3, *c* kahe mähise keskmised klemmid, on pinge äärmiste klemmide (*a* ja *x*) vahel null (juhul kui mähistel on sama keerdude arv). Selles võib veenduda, kui ühendada voltmeeter nende klemmidega. Kui aga ühendada kokku ülemise ja alumise mähise samanimelised klemmid (x_1 ja x_2), saame klemmide a_1 ja a_2 vahel pinge $E_1 + E_2$.

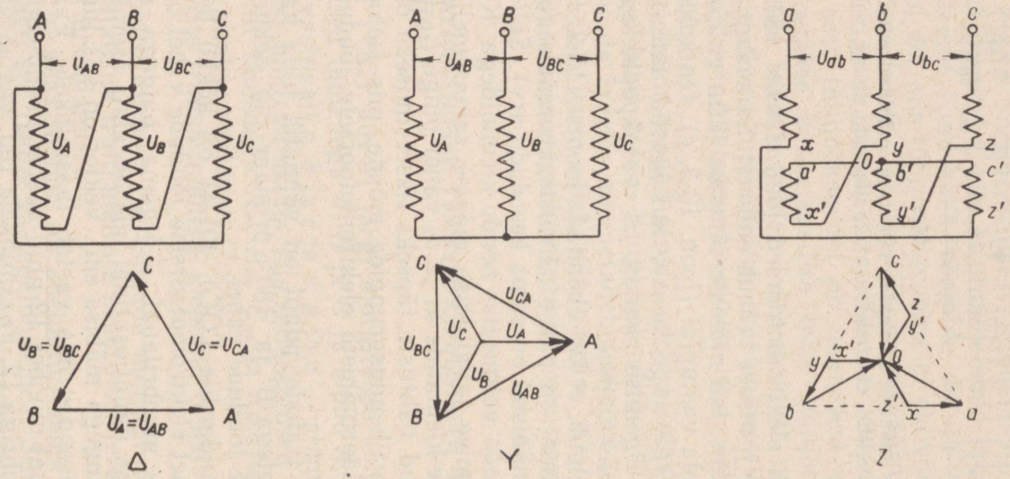
Ülalkirjeldatud nähtuste täpseks fikseerimiseks on võetud kasutusele mähiste ühendusgruppide mõiste, mis iseloomustab primaar- ja sekundaarmähiste elektromotoorsete jõudude omavahelist faasinihet.

Ühefaasiliste trafode puhul on võimalik luua kaks ühendusgruppi: faasinihetega 0° ja 180° primaar- ja sekundaarmähiste elektromotoorsete jõudude vahel.

Vastavalt standardile ГОСТ 401-41 on kokku lepitud iseloomustada faasinihet elektromotoorsete jõudude vahel osutite asendi kaudu ajanäitaja numbrilaual. Kõrgema pingega mähise emj. vektor kujutatakse minutiosutina, mis on alati asetatud numbrile 12. Madalama pingega mähise emj. vektor on siis tunniosutiks ja see näidatakse asendis, mis vastab faasinihkele. Faasinihkele 0° vastab numbrilaual number 12 ning vastav ühendusgrupp tähistatakse samuti numbriga 12. Faasinihkele 180° vastab ühendusgrupp 6, jne.

Ühefaasilise trafo puhul on standardi ГОСТ 401-41 kohaselt ette nähtud kasutada ühendusgruppi 12, mis märgitakse lühendatult I/I-12.

Kolmefaasiliste trafode mähised ühendatakse kolmel viisil, kusjuures enamasti on kasutusel täht- ja kolmnurkühendus, har-



Joon. 13-4. Mähiste ühendusskeemid

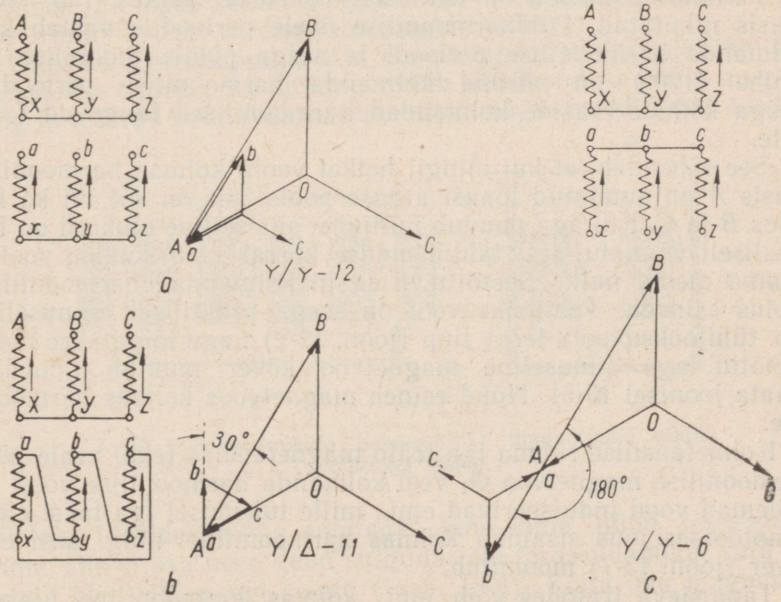
vemini aga siksakühendus. Neid ühendusviise tähistatakse vastavalt Y, △ ja Z. Nullpunkti esinemise puhul kirjutatakse tähise juurde indeks 0 (Y_0, Z_0). Joonisel 13-4 on toodud mähiste ühendusskeemid.

Ühendusskeemid Y, △ ja Z võivad moodustada 12 erinevat ühendusgruppi, liini elektromotoorsete jõudude faasinihkega 0° kuni 330° iga 30° järel. Ühendusskeemid Y/Y, △/△, △/Z moodustavad paarisarvulised grupid 2, 4, 6, 8, 10, 12, kuna ühendusskeemid Y/△, △/Y, Y/Z — paarituarvulised grupid 1, 3, 5, 7, 9, 11. Ühendusskeemi märkiva murru lugeja annab kõrgema, nimetaja — madalama pingega mähise ühendusviisi.

Vaatleme lähemalt ühendusskeeme Y/Y ja Y/△. Selleks näitame joonisel 13-5 samal südamikul asuvad mähised ülestikku, oletades, et kõikide mähiste mähkimissuund on sama. Siis samadel sammastel asuvate mähiste elektromotoorsete jõudude vektorite suunad on ka samad. Olgu seejuures klemmid *A* ja *a* omavahel elektriliselt ühendatud.

Kui joonisel 13-5, *a* näidatud skeemile vastaval vektordiagrammil liini emj. vektor *AB* suunata ajanäitaja numbrilaual numbrile 12, siis ka vektor *ab* on suunatud samasse. Seega on tegemist ühendusega Y/Y-12. Joonisel 13-5, *b* ja *c* on vastavalt selgitatud ühenduste Y/△-11 ja Y/Y-6 tekkimine.

Standardis ГОСТ 401-41 on normaalsetele jõutrafodele kõiki-



Joon. 13-5. Mähiste ühendusgrupid

dest võimalikest ühendusgruppidest soovitatud kasutada Y/Y-12 ja Y/△-11, mis on seletatav nii ekspluatatsiooni lihtsustamise kui ka tootmise hõlbustamise nõudega.

Siksakühendus vajab, nagu selgub jooniselt 13-4, $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}16$ korda enam keerde sama pinge saavutamiseks, sest mähiseosade pinged siksakühendusel summeeruvad geomeetriliselt, mitte aga aritmeetiliselt. NSV Liidus normaalsetes jõutrafodes seda ühendusviisi ei kasutata.

13-3. KOLMEFAASILISE TRANSFORMAATORI TÜHIJOOKS

Eespool selgitasime ühefaasilise trafo tühijooksu ja sellega seotud tühijooksuvoolu kõvera moonutamist (vt. p. 12-1).

Kolmefaasilise trafo tühijooks on mõnevõrra erinev ühefaasilise trafo omast. Nähtused kolmefaasilise trafo tühijooksul omavad suurt tähtsust ekspluateerimisel ning vajavad seepärast lähemat selgitamist.

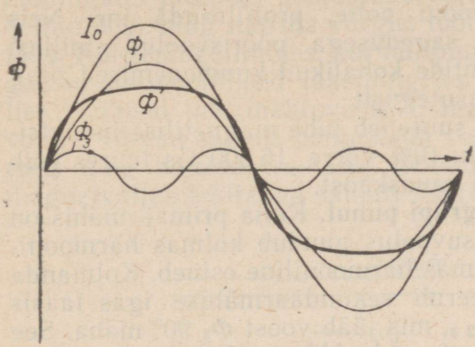
Tühijooks ühendusgrupi Y/Y puhul. Vaatleme esmalt kolmefaasilises süsteemis töötavat kolme ühefaasilist trafot, mis on ühendatud eelmainitud ühendusgrupi kohaselt. Võrreldes ühefaasilise trafoga on põhiliseks erinevuseks see, et kolmefaasilises trafode rühmas puuduvad tühijooksuvoolu kolmandad harmoonilised.

Põhiharmoonilised on teatavasti üksteise suhtes 120° võrra faasis nihutatud. Põhiharmoonilise ühele perioodile vastab kolm kolmanda harmoonilise perioodi ja seega põhiharmoonilise faasinihe (120°) on võrdne kolmanda harmoonilise perioodiga. Seega kõikide faaside kolmandad harmoonilised langevad faasis ühte.

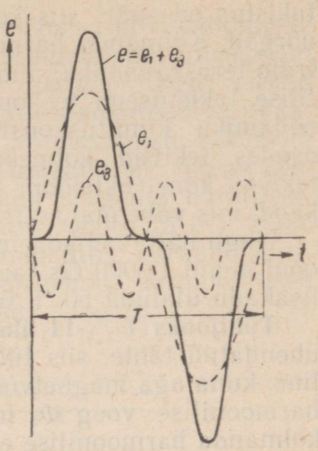
See tähendab, et kui mingil hetkel voolu kolmas harmooniline faasis *A* on suunatud lõpust alguse poole, siis on see nii ka faasides *B* ja *C*. Kui aga puudub nulljuhe, siis selline olukord on füüsikaliselt võimatu, sest tähtühenduse korral peab kõikide voolude summa olema null. Seetõttu ei saagi kolmandad harmoonilised voolus esineda. Tühijooksuvool on seega praktiliselt siinuseline, s. o. tühijooksuvoolu terav tipp (joon. 12-2) nagu lõigatakse maha. Seetõttu aga siinuseline magnetvoo kõver muutub lamedaks (vaata joonisel 13-6). Nüüd esineb magnetvoos kolmas harmooniline.

Kolmefaasilise rühma iga trafo magnetahelas tekib peale põhiharmoonilise magnetvoo Φ_1 veel kolmanda harmoonilise voog Φ_3. Mõlemad vood indutseerivad emj., mille tulemusel iga faasi elektromotoorses jõus sisaldub kolmas harmooniline, ning faasi emj. kõver (joon. 13-7) moonutub.

Tänapäeva trafodes võib emj. kolmas harmooniline ulatuda 50 ... 60%-ni põhiharmoonilisest, mille tulemusel samavõrra kas-



Joon. 13-6. Magnetvoo kõvera kuju kolmefaasilises Y/Y-12 trafos ning tema harmoonilised



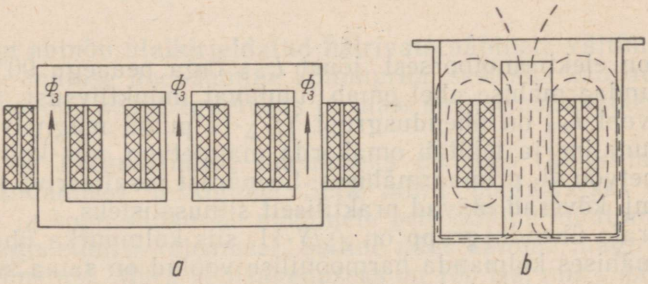
Joon. 13-7. Faasi emj. moonutus kolmandast harmoonilisest ühendusel Y/Y-12

vab faasipinge amplituud, faasipinge efektiivväärtus aga 12... 17%.

Selline pinge tõus ei ole lubatav, kuna see võib ohustada trafo mähise isolatsiooni ja tarbijaid.

Liinipinge jääb aga siinuseliseks, kuna liinipinges emj. kolmas harmooniline kaob samal põhjusel kui voolu kolmas harmooniline (sest liinipinge on võrdne faasipingete vahega).

Olukord on teistsugune siis, kui on tegemist südamiktüüpi kolmefaasilise trafoga. Ka siin moonutub tähtühenduse puhul magnetvoog ja tekivad kolmanda harmoonilise magnetvood. Need vood on



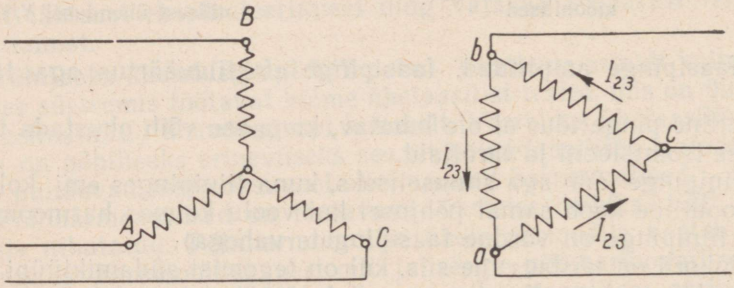
Joon. 13-8. Kolmanda harmoonilise magnetvood südamiktüüpi trafos

kõikides faasides sama suunaga, kuid kuna nüüd on südamik ühine, siis ei saa need vood sulguda läbi terassüdamiku, vaid sulguvad õlis, läbi paagi seinte (joon. 13-8). Kuna õhu magnetiline

takistus on suur, siis kolmanda harmoonilise vood on suhteliselt nõrgad. Kolmanda harmoonilise magnetvood, sulgudes väljaspool trafo terassüdamiku, püüavad loomulikult läbida väiksema magnetilise takistusega teekonda, kasutades selleks paagi seinu, trafo südamiku kinnituskonstruktsiooni polte, profiilrauda jne. Neis osades tekivad kolmekordse sagedusega pöörisvoolud, millest tekivad konstruktsiooni elementide kohalikud kuumenemised ning kaod, mis vähendavad trafo kasutegurit.

Nagu näitavad kogemused, suureneb juba magnetilise induktsiooni puhul 14 000 Gs rauaskadu 10% võrra, 16 500 Gs juures võib lisakadu ulatuda 50 . . . 65%-ni rauaskaost.

Tühijooks Y/△-11 ühendusgrupi puhul. Kuna primaarmähis on ühendatud tähte, siis tühijooksuvoolus puudub kolmas harmooniline, kuna aga magnetvoos kolmas harmooniline esineb. Kolmanda harmoonilise voog Φ_3 indutseerub sekundaarmähise igas faasis kolmanda harmoonilise emj. $E_{2\,3}$, mis jääb voost Φ_3 90° maha. See emj. tekitab sekundaarmähise faasides voolu $I_{2\,3}$. Need voolud, olles faasis, sulguvad sekundaar-kolmnurgas (joon. 13-9). Need



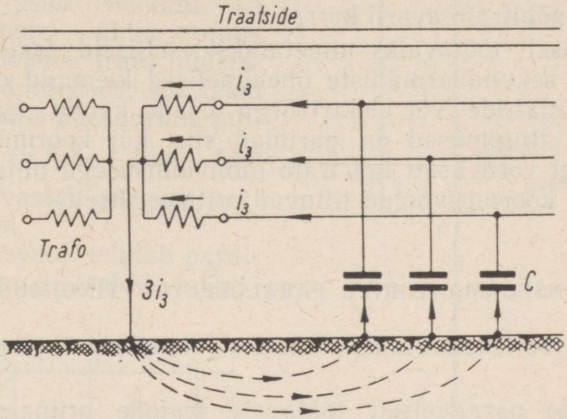
Joon. 13-9. Kolmanda harmoonilise voolud

voolud on elektromotoorsest jõust $E_{2\,3}$ taga peaaegu 90° võrra, sest sekundaarmähise ahel omab tunduvat induktiivsust. Siit selgub, et vool $I_{2\,3}$ on ühendusgrupi Y/△-11 puhul magnetvoole Φ_3 vastassuunaline ja tekitab omakorda magnetvoo, mis kompenseerib magnetvoo Φ_3 primaarmähises. Seepärast resulteeriva magnetvoo ja emj. kõverad jäävad praktiliselt siinuselisteks.

Kui trafo ühendusgrupp on △/Y-11, siis kolmnurka ühendatud primaarmähises kolmanda harmoonilise voolud on sama suunaga. Kui aga vool annab kolmanda harmoonilise, siis on magnetvoo, primaarse ja sekundaarse elektromotoorse jõu kõverad lähedased siinuskõverale. Seega jäävad ära eespool nimetatud ebasoovitavad nähtused.

Praktilised järeldused. Nagu eespool selgus, tekib teatud tingimustel primaarmähises kõrgemate harmooniliste (eriti kolmanda) voolud. Kui kolmanda harmoonilise vool ei saa esineda Y/Y ühen-

dusel, tekib kolmas harmooniline magnetvoos ja faasipinges. Seega osutub trafo südamik ebalineaarsete omaduste tõttu kõrgemate harmooniliste generaatoriks. Need harmoonilised võivad mõningatel juhtudel põhjustada võrkudes resonantsinähtusi (kaabelliinides) ning häirida võrgus töötavate mitmesuguste seadmete tööd. Kõrgepingeliinides, kui nullpunkt on maandatud, võivad kõrgemad harmoonilised faasipingetes tekitada kõrgema harmoonilise voolusid läbi mahtuvuste C maa suhtes (joon. 13-10). Need voolud võivad samuti põhjustada resonantsinähtusi võrkude seadmeis ning häirida traatside töötamist. Kõrgemad harmoonilised magnetväljas tekitavad samuti lisarauaskao.



Joon 13-10. Sideliiniga aheldatud kolmanda harmoonilise voog

Parim abinõu ülalkirjeldatud häirivate nähtuste vältimiseks on trafo ühe mähise ühendamine kolmnurka, sest siis kaovad kõrgemad harmoonilised magnetvoos ja faasi elektromotoorsetes jõududes.

Trafode magneetimise tulemuseks on peale kõige muu veel müra (undamise) tekkimine. Selle müra põhjustajaks on trafo plekkide ja kogu südamiku mõõtmete perioodiline muutumine korduva magneetimise tulemusel. Selline nähe kannab magnitostriktsiooni nimetust. Müra põhisageduseks on 100 Hz, mis vastab magneetimise sagedusele voolu sagedusel 50 Hz: Müra on seda tugevam, mida suurem on induktsioon, kuid tugevneb veelgi, kui magneetimise periood satub resonantsi mõne magneeditava eseme omavõnkumise sagedusega. Tavaliselt sõltub müra tugevus trafo võimsusest ning on seda suurem, mida võimsam on trafo.

TRANSFORMAATORITE PARALLEELTÖÖ

14-1. TRANSFORMAATORITE PARALLEELTÖÖ MÕISTE

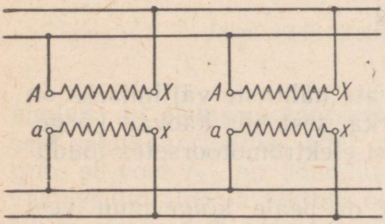
Väga tihti seatakse alajaamades üles kaks ja enam trafot. Ühe trafo asemel mitme väiksema ülesseadmine võimaldab ööpäevase või sesoonse koormuse kõikumisele vastavalt võrku lülitada vajalikule võimsusele vastav arv trafosid. Sel teel osutub võimalikuks vähendada energiakadu rauaskao vähenemise arvel. Teiselt poolt, energiaga varustamise katkestamatuse seisukohalt osutub mõnikord vajalikuks üles seada reservtrafo, mis võtaks endale koormuse mõne põhitrafo avarii korral.

Paralleelselt töötavaiks nimetatakse selliseid trafosid, mille primaar- ja sekundaarmähiste ühenimelised klemmid on ühendatud kogumislattide või elektrivõrgu osade kaudu (joon. 14-1). Paralleeltöö tingimused on parimad siis, kui koormus jaguneb trafode vahel võrdeliselt iga trafo nimivõimsusega ning kui üksikute trafode koormusvoolud liituvad aritmeetiliselt.

14-2. TRANSFORMAATORITE PARALLEELTÖÖ TINGIMUSED

Paralleeltöö teostamiseks peavad olema täidetud järgmised tingimused:

1) kõikide paralleelselt töötavate trafode primaarpinged ja sekundaarnimipinged peavad olema võrdsed (s. o. ülekandetegurid peavad olema võrdsed);



Joon. 14-1. Trafode paralleellülitus

2) paralleelselt töötavate trafode ühendusgrupid peavad olema samad;

3) kõikide trafode lühispinge aktiiv- ja reaktiivkomponendid peavad olema võrdsed.

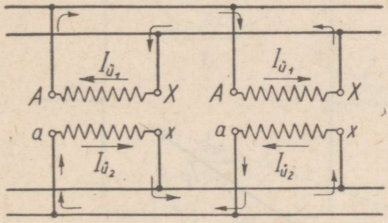
Primaarpingete ja sekundaarpingete võrdsus. Oletame, et paralleelselt töötab kaks sama võimsusega trafot, kusjuures nende ülekandetegurid ei ole võrdsed: $k_I \neq k_{II}$. Lühistakistused olgu seejuures võrdsed: $Z_{II} = Z_{II} = Z_I$. Kui lülitada trafode primaarmähised paralleelselt võrku pingega U_1, on nende trafode sekundaarpinged vastavalt U_2' ja U_2'', kusjuures $U_2' \neq U_2''$. Kui nüüd ka sekundaarpooled lülitada omavahel paralleelselt, siis tekib paralleelselt lülitatud trafo mähiste vahelise pinge $\Delta U = U_2' + U_2''$ mõjul *ühtlustusvool*

(joon. 14-2). Kuna sekundaarpinge vektorid on omavahel vastassuunalised (vt. joon. 14-3), siis pingevektorite summa $U_2' + U_2''$ on tegelikult võrdne vahega. Trafod on üksteise suhtes lühise olukorras, seepärast tuleb ühtlustusvoolu arvutada nii nagu lühisvoolu lühistakistuste kaudu:

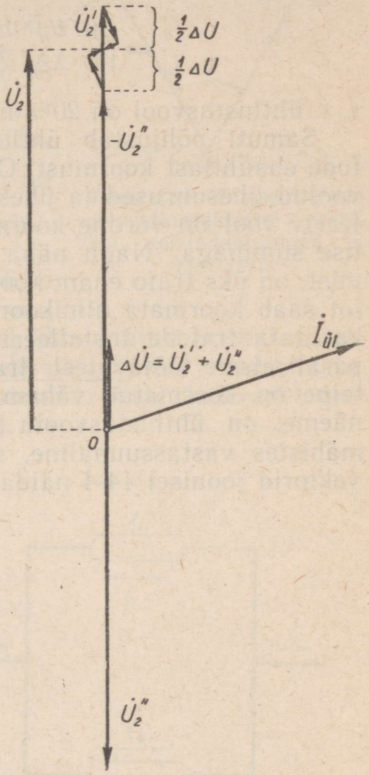
$$I_{ü} = \frac{\Delta U}{Z_{II} + Z_{III}} = \frac{\Delta U}{2Z_l}.$$

Ühtlustusvool läbib paralleelselt töötavate trafode mähised vastassuundades ja tekitab neis sellised pingelangud, mille tulemusel peab tekkima ka sekundaarpoolel ühine pinge U_2. Kuna mõlema trafo lühistakistused olid võrdsed, siis tekib mõlemas trafos ühesuurune pingelang $\frac{\Delta U}{2} = I_{ü} Z_l$. Joon. 14-3 on toodud vastav pingete vektordiagramm.

Ühtlustusvool tekitab paralleelselt töötavate trafode mähis-



Joon. 14-2. Ühtlustusvool trafode paralleeltöö korral



Joon. 14-3. Pingete vektordiagramm trafode paralleeltöö korral, kui ülekandetegurid ei ole võrdsed

tes lisakadusid (isegi tühijooksul). Näiteks kui kahe paralleelselt töötava ühefaasilise trafo pinge erineb 2% võrra ning seejuures mõlema lühispinge on $U_l = 5\%$, siis

$$U_l = \frac{I_n Z_l}{U_n} \cdot 100,$$

millest

$$I_n = \frac{U_l U_n}{100 Z_l};$$

ühtlustusvool

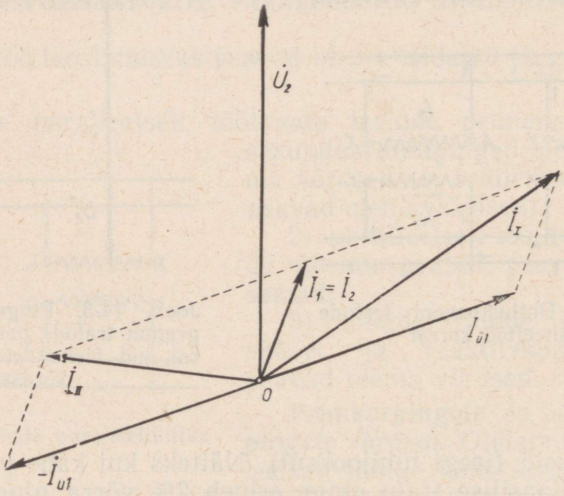
$$I_{ü} = \frac{\Delta U}{100} \cdot \frac{U_n}{2Z_l}.$$

Seega

$$\frac{I_{ü}}{I_n} = \frac{\Delta U U_n}{100 \cdot 2Z_l} \cdot \frac{100 Z_l}{U_l U_n} = \frac{\Delta U}{2U_l} = \frac{2}{2 \cdot 5} = 0{,}2,$$

s. t. ühtlustusvool on 20% nimivoolust.

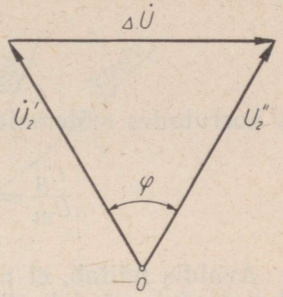
Samuti põhjustab ühtlustusvool paralleelselt töötavate trafode ebaühtlast koormust. Olgu kõne all olevate trafode koormusvoolud ühesuurused ja ühesuguste faasinihetega. Iga trafo resulteeriv vool on võrdne koormusvoolu ja ühtlustusvoolu geomeetrilise summaga. Nagu näha joonisel 14-4 antud vektordiagrammist, on üks trafo enam koormatud kui teine (I_{I} ja I_{II}). Kuna trafot saab koormata nimikoormuseni, siis ebaühtlasel koormusel ei kasutata trafode installeeritud võimsust täielikult ära. Kui üks paralleelselt töötavatest trafodest on täielikult koormatud, siis teine on koormatud vähem kui võimalik. Nagu joonisel 14-2 näeme, on ühtlustusvoolu suund paralleelselt töötavate trafode mähistes vastassuunaline, sellepärast on trafode ühtlustusvoolu vektorid joonisel 14-4 näidatud vastassuunalistena.



Joon. 14-4. Ühtlustusvoolu mõju paralleelselt töötavate trafode koormamisele

Ühendusgruppide samaväärsus. Paralleelselt töötavate trafode primaarpinged on alati faasis. Sekundaarpinged võivad aga olla faasis nihutatud, kui ühendusgrupid ei ole samad. Selle tõttu

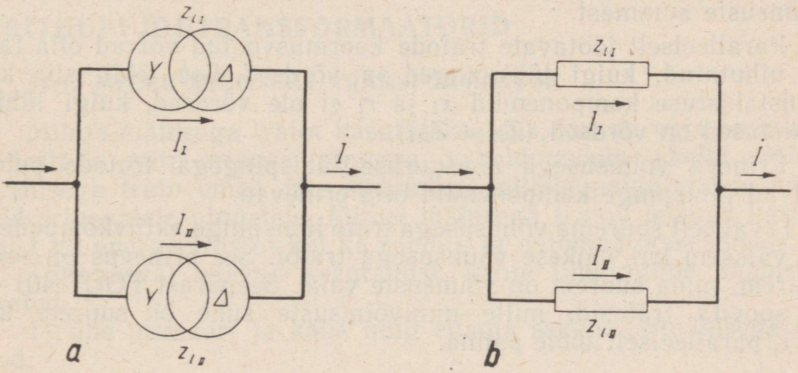
tekib sekundaarahelas pinge ΔU, mis on võrdne sekundaarpingete geomeetrilise vahega (joon. 14-5). Selle tulemusel tekib jällegi ühtlustusvool, mis põhjustab eespool mainitud kahjulikke nähtusi.



Joon. 14-5. Pinge trafode sekundaarmähiste vahel, kui sekundaarpinged ei ole faasis

Kui näiteks ühendada paralleelselt töötole kaks sama võimsusega ja lühispingega trafot, millede grupid on vastavalt Y/Y-12 ja Y/Y-6, siis tekib sekundaarmähiste vahel pinge $\Delta U = U_2 - (-U_2) = 2U_2$ ja ühtlustusvool $I_{ü} = \frac{2U_2}{2Z_l} = I_l$. Viimane on võrdne lühisvooluga ja seega täiesti lubamata.

Lühispingete võrdsus. Joonisel 14-6, *a* on antud kahe paralleelselt töötava trafo skeem. Kasutame joonisel 14-6, *b* antud lihtsustatud skeemi, taandades sekundaarmähised primaarpoolele ning jättes arvestamata väikese magneetimisvoolu. Olgu seejuures trafode ülekandeteguurid võrdsed, kuid lühispinged erinevad.



Joon. 14-6. Erinevate lühispingetega trafode paralleeltöö

Joonisélt 14-6, *b* leiame:

$$I_I Z_{lI} = I_{II} Z_{lII}$$

ehk

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{II}}{Z_I}.$$

Avaldades lühistakistused lühispingete kaudu

$$\frac{I_{\mathrm{I}}}{I_{\mathrm{II}}} = \frac{\frac{U_{\mathrm{III}}}{I_{\mathrm{IIn}}}}{\frac{U_{\mathrm{II}}}{I_{\mathrm{In}}}}$$

ja korrutades mõlemaid pooli pingega u_t, leiame:

$$\frac{U_{\mathrm{II}}}{U_{\mathrm{III}}} = \frac{P_{\mathrm{I}}}{P_{\mathrm{II}}} = \frac{u_{\mathrm{III}}}{u_{\mathrm{II}}} \cdot \frac{P_{\mathrm{In}}}{P_{\mathrm{IIn}}}. \qquad (14\text{-}1)$$

Avaldis näitab, et paralleelselt töötavate trafode koormus (P_{I}, P_{II}) jaotub võrdeliselt trafode nimivõimsustega (P_{In}, P_{IIn}) ja pöördvõrdeliselt lühispingetega (u_{II}, u_{III}).

Eelmisest võrdusest leiame:

$$\frac{P_{\mathrm{I}}}{P_{\mathrm{In}}} : \frac{P_{\mathrm{II}}}{P_{\mathrm{IIn}}} = \frac{1}{u_{\mathrm{II}}} : \frac{1}{u_{\mathrm{III}}}. \qquad (14\text{-}2)$$

Järelikult kahest paralleelselt töötavast trafost koormatakse üle väiksema lühispingega trafo.

Lühispinged ei tohi erineda üle 10%, kuna siis on summaarne paralleelselt töötavate trafode koormus 95% üksikute trafode võimsuste summast.

Paralleelselt töötavate trafode koormusvoolud võivad olla faasis nihutatud, kuigi lühispinged on võrdsed. See tekib siis, kui lühistakistuse komponendid x_t ja r_t ei ole võrdsed, kuigi lühistakistused on võrdsed ($Z_{\mathrm{II}} = Z_{\mathrm{III}}$).

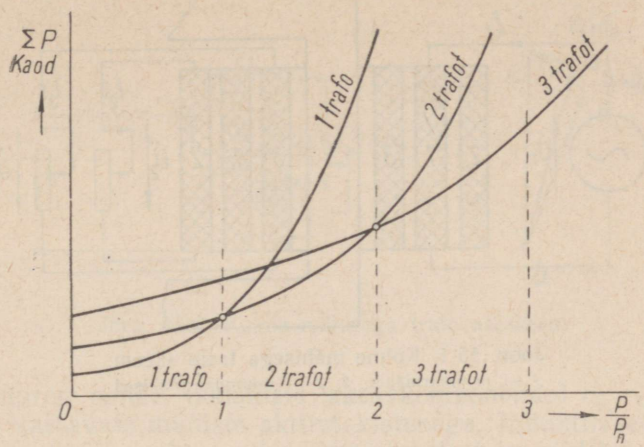
Erineva võimsusega ühesuuruse lühispingega trafode puhul võivad lühispinge komponendid olla erinevad.

Tavaliselt suurema võimsusega trafo lühispinge aktiivkomponent on väiksem kui väikese võimsusega trafol. See erinevus on seda suurem, mida suurem on võimsuste vahe. Seepärast ГОСТ 401-41 ei soovita trafosid, mille nimivõimsuste suhe on suurem kui 3 : 1, paralleelselt tööle panna.

14-3. ENERGIAKAOD TRANSFORMAATORITE PARALLEELTÖÖL

Määrates paralleelselt lülitatud trafode summaarsed kaod, võib kindlaks teha koormuse piirid, mille puhul on otstarbekohane üle minna ühe trafoga töötamiselt kahe, kolme jne. trafoga töötamisele.

Olgu kolm ühesuuruse võimsusega ja võrdsete kadudega trafot lülitatud paralleelselt. Märgime graafikule kaod ühe, kahe või kolme trafoga töötamisel. Saadud kõverate lõikepunktid näitavad, missuguse koormuse puhul on sobiv üle minna ühe trafoga töötamiselt kahe, kolme jne. trafoga töötamisele (joon. 14-7).



Joon. 14-7. Paralleelselt töötavate trafode arv sõltuvalt kadudest

XV PEATÜKK

ERITÜÜPI JÕUTRANSFORMAATORID

15-1. MITME MÄHISEGA TRANSFORMAATOR

Mitme mähisega trafot kasutatakse siis, kui on vaja omavahel sidestada mitu erineva pingega vahelduvvoolu ahelat. Mitme mähisega trafo omab ühe südamiku, millele paigutatakse mähised erinevatele pingetele. Mitme mähisega trafod leiavad kasutamist nii energeetilistes kui ka raadio- ja automaatikaseadmeis.

Tänapäeval leiavad kasutamist kahte liiki mitme mähisega trafod:

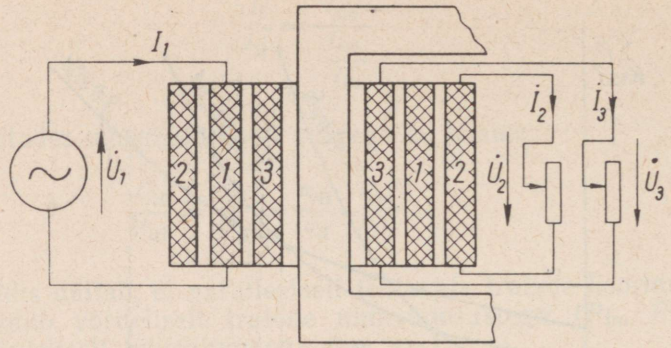
1) ühe primaar- ja kahe ning enama sekundaarmähisega trafod;

2) kahe või enama primaarmähisega erinevaist vooluallikaist toidetavad ja ühe või enama sekundaarmähisega trafod.

Raadio- ja automaatikaseadmeis kasutatakse peamiselt esimest liiki trafosid. Energeetikas on kõige enam levinud ühe primaar- ning erineva pingega kahe sekundaarmähisega trafod. Viimaseid nimetatakse *kolme mähisega trafodeks* (joon. 15-1). Mähised asetatakse südamikule kontsentriliselt, kusjuures primaarmähis võib asuda kas sekundaarmähiste vahel (joon. 15-1) või viimased asuvad ühel pool primaarmähist.

Oletame, et kõik mähised on taandatud ühisele keerdude arvule ($w_1 = w_2 = w_3$). Siis analoogiliselt kahe mähisega trafole võime voolude kohta kirjutada võrrandi:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \dot{I}_0, \qquad (15\text{-}1)$$



Joon. 15-1. Kolme mähisega trafo skeem:
1 — primaarmähis; *2, 3* — sekundaarmähised

kusjuures on ära jäetud taandamist tähistav indeks. Kuna tühijooksuvoolu I_0 võib lugeda teistega võrreldes tähtsusetuks, siis voolude võrrand kujuneb järgmiseks:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0. \tag{15-2}$$

Kolme mähisega trafo kohta võib kirjutada kahe mähisega trafole analoogilised elektromotoorsete jõudude võrrandid.

Kuna mähised kolme mähisega trafol asuvad üksteise läheduses, siis avaldavad nad ka üksteisele mõju. Näiteks voolu I_3 muutumisel muutub mitte ainult sama mähise pinge U_3, vaid ka teise sekundaarmähise pinge U_2. Voolu I_3 muutumisel muutub ka vool I_1 primaarmähises, mis põhjustabki pinge U_2 muutumise.

Pingevektorite summad $\dot{U}_1 + \dot{U}_2$ ja $\dot{U}_1 + \dot{U}_3$ on kolme mähisega trafo pingelangude iseloomustajaiks. Tühijooksul on need summad võrdsed nulliga. Mainitud pingete summade võrrandid saame kolme mähisega trafo voolude ja elektromotoorsete jõudude võrranditest:

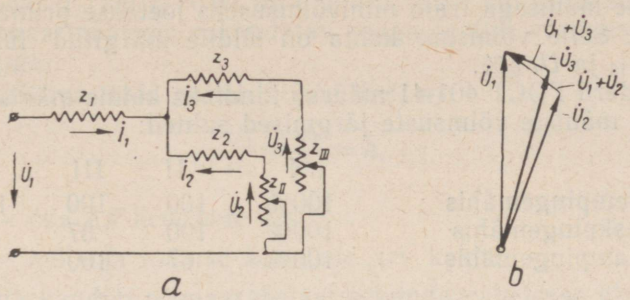
$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{U}_2 &= \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2, \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_3 &= \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_3 Z_3. \end{aligned} \tag{15-3}$$

Viimastest aga võime kirjutada:

$$\dot{U}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2) = -(\dot{U}_3 + \dot{I}_3 Z_3). \tag{15-4}$$

Selles võrrandis esinevad näivtakistused Z_1, Z_2, Z_3 on kolme mähisega trafo vastavate mähiste näivtakistusteks ja on avaldatud ka teisiti:

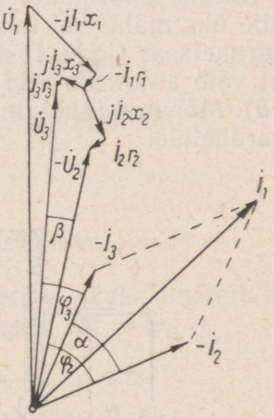
$$\begin{aligned} Z_1 &= r_1 + \mathrm{j}x_1, \\ Z_2 &= r_2 + \mathrm{j}x_2, \\ Z_3 &= r_3 + \mathrm{j}x_3. \end{aligned}$$



Joon. 15-2. Kolme mähisega trafo aseskeem

Seejuures nende takistuste aktiivkomponendid r_1, r_2 ja r_3 on võrdsed vastavate mähiste aktiivtakistusega. Induktiivsed komponendid x_1, x_2 ja x_3 olenevad puistevoogudest ja neid tuleb lugeda ekvivalentseteks reaktiivtakistusteks, mille suurus sõltub mähiste vastastikkusest asendist trafo südamikul. Joonisel 15-1 näidatud mähiste asetuse puhul on keskmise mähise (1) reaktiivtakistus lähedane nulliga ja tihti isegi negatiivne.

Võrrand (15-4) võimaldab joonestada kolme mähisega trafo aseskeemi (joon. 15-2, *a*). Aseskeemil näidatud muudetavad takistused Z_{II} ja Z_{III} on vastavate sekundaarmähiste ahelasse ühendatud koormustakistused.



Joon. 15-3. Kolme mähisega trafo vektordiagramm

Võrrandite (15-3) alusel võib joonestada kolme mähisega trafo vektordiagrammi (joon. 15-3), kus $x_1 = 0$, kui mähis *1* asub mähiste *2* ja *3* vahel.

Kolme mähisega trafo parameetrid leitakse samuti tühijooksu- ja lühisekatsetest. Viimaseid tuleb teostada mitu (kolm).

Kolme mähisega trafo primaar- ja sekundaarmähiste võimsused, samuti nagu kahe mähisega trafol, on seotud järgmiselt:

$$mU_1I_1 \approx mU_2I_2 + mU_3I_3, \qquad (15\text{-}5)$$

kus m — faaside arv (tavaliselt 3).

Üldjuhul kehtib voolude vahel seos

$$I_1 + \frac{I_2}{k_{12}} + \frac{I_3}{k_{13}} = 0, \qquad (15\text{-}6)$$

kus k_{12} ja k_{13} on trafo ülekandetegurid:

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}, \qquad k_{13} = \frac{w_1}{w_3} = \frac{E_1}{E_3} \approx \frac{U_1}{U_{30}}.$$

Kolme mähisega trafo nimivõimsuseks loetakse primaarmähise võimsus. Selle võimsuse kohta on sildile märgitud lühispinged $U_{l\,12}$, $U_{l\,13}$ ja $U_{l\,23}$%.

Standard ГОСТ 401-41 määrab kindlaks kolme mähisega trafo üksikute mähiste võimsuste järgmised suhted:

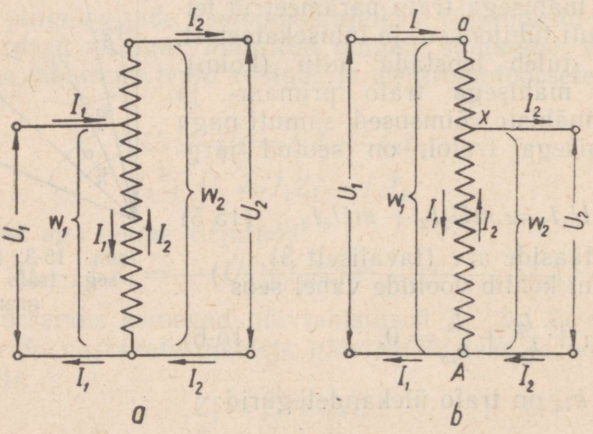
	I	II	III	IV
ülempingemähis	100%	100	100	100
keskpingemähis	100%	100	67	67
alampingemähis	100%	67	100	67

Lühispinge ülempinge- ja keskpinge- ning ülempinge- ja alampingemähiste vahel on kas 17 või 10,5%, keskpinge- ja alampingemähiste vahel — 6%.

Kolme mähisega võimsustrafode ühendusgrupid on standardi alusel: $Y_0/Y_0/\triangle$-12-11 ja $Y_0/\triangle/\triangle$-11-11 kolmefaasilistel ja I/I/I-12-12 ühefaasilistel trafodel. Kolmefaasilistel trafodel on vähemalt üks mähistest ühendatud kolmnurka, et vähendada kõrgemate harmooniliste mõju ja häireid ebasümmeetrilisel koormusel.

15-2. AUTOTRANSFORMAATOR

Autotransformaatoriks nimetame sellist kahe mähisega trafot, mille üks mähistest kuulub üheaegselt nii primaar- kui ka sekundaarahelasse (joon. 15-4). Olenevalt primaarpinge rakendamise viisist võib autotrafo olla pinget tõstev või madaldav (joon. 15-4, *a* ja *b*). Mõlemal juhul on mähis *AX* ühine nii primaar- kui ka sekundaarahelale.



Joon. 15-4. Autotrafo ühendusskeem:
a — pinget tõstev; *b* — pinget madaldav

Tühijooksul (kui $I_2 = 0$) on olukord sama kui tavalises trafos. Trafo primaarmähisele rakendatav pinge jaotub võrdeliselt keerdude arvuga.

Pingettõstva trafo puhul (joon. 15-4, *a*)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k, \tag{15-7}$$

kus w_1 — osa AX keerdude arv,

w_2 — mõlema mähise keerdude arv kokku.

Energia kandub primaarahelast sekundaarahelasse ühise magnetvälja kaudu ja ka otseselt, mähiste vahelise elektriliselt juhtiva ühenduse kaudu. Kui ei arvestata seejuures tekkivaid kadusid, võib lugeda võimsused primaar- ja sekundaarpoolel võrdseteks:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2 = P. \tag{15-8}$$

Mõlemast eelmisest võrrandist leiame:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \tag{15-9}$$

Vool ühises mähises AX on võrdne voolude I_1 ja I_2 geomeetrilise summaga. Arvestamata magneetimisvoolu, võime kirjutada seose:

$$I_{12} = I_1 + I_2 = I_1(1 + k) = I_2\left(1 + \frac{1}{k}\right). \tag{15-10}$$

Magnetvälja kaudu edasiantav võimsus on üldjuhul

$$P_{em} = EI = k_E \Phi I w.$$

Autotrafos vastavalt

$$P_{em} = k_E \Phi I_1 (w_1 - w_2) = k_E \Phi I_{12} w_2,$$

sest kui oleks $k = 1$, siis antaks kogu energia edasi otseselt primaarpoolelt sekundaarpoolele ja $P_{em} = 0$, sest $w_1 = w_2$.

Kuna $k_E(w_1 - w_2) = E_1 - E_2$ ja $k\Phi w_2 = E_2$, siis

$$P_{em} = (E_1 - E_2) I_1 = E_2 I_{12} \approx (U_1 - U_2) I_1 = U_2 I_{12}. \tag{15-11}$$

See võimsus on autotrafo arvutuslikuks võimsuseks, mille alusel määratakse trafo südamiku mõõtmed, mähiste keerdude arv ja juhtmete ristlõige.

Arvutusliku ja üldise võimsuse (vt. valem 15-8) suhe on seega

$$\frac{P_{em}}{P} = \frac{(U_1 - U_2) I_1}{U_1 I_1} = 1 - \frac{U_2}{U_1} \approx 1 - \frac{1}{k}.$$

Viimasest seosest leiame arvutusliku (elektromagnetilise) võimsuse:

$$P_{em} = P\left(1 - \frac{1}{k}\right). \qquad (15\text{-}12)$$

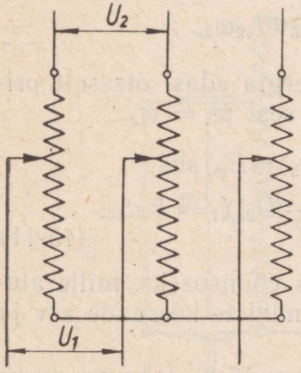
Lahutades üldisest primaarahelast sekundaarsesse ülekantavast võimsuset P elektromagnetilisel teel ülekantava võimsuse P_{em}, saame primaarpoolelt sekundaarpoolele otseselt ülekantava võimsuse:

$$P - P_{em} = P - P\left(1 - \frac{1}{k}\right) = P\frac{1}{k}. \qquad (15\text{-}13)$$

Viimastest valemitest selgub, et autotrafo on seda kasulikum, mida vähem erineb ülekandetegur k ühest. Arvutuslik võimsus P_{em} (valem 15-12) on võrreldes üldise võimsusega P, millele arvutatakse tavaline trafo, seda väiksem, mida lähemal on ülekandetegur k ühele. Ühtlasi on siis ka autotrafo ehitamiseks vajalik aktiivsete materjalide (terase ja vase) kulu väike. Kaalu vähenemine põhjustab ka elektriliste ja magnetiliste kadude vähenemist ja seega autotrafo kasutegur sama üldvõimsuse P puhul on kõrgem kui tavalisel trafol.

Autotrafo lühis kulgeb tunduvalt raskemates tingimustes kui tavalisel kahe mähisega trafol. Näiteks kui joonisel 15-4, *b* antud autotrafos tekib lühis sekundaarpoolel, siis lühistatakse mähise osa AX, kuna aga mähise osal ax tõuseb pinge primaarpinge U_1 väärtuseni. Selle tulemusel läbib trafot lubamatult suur lühisvool, küllastub tugevalt trafo südamik ja suureneb tunduvalt mageetimisvool.

Ekspluateerimise ohutuse seisukohalt on lubamatu kasutada autotrafot, mille ülekandetegur erineb palju ühest. Suure ülekandeteguri puhul, kui katkeb trafo mähise ühine osa, osutub madalpinge-pool kõrgepinge all olevaks.



Joon. 15-5. Kolmefaasilise autotrafo skeem

Kolmefaasilise autotrafo (joon. 15-5) primaarmähis ühendatakse tavaliselt tähte ja teda kasutatakse võimsates kõrgepingevõrkudes kahe lähedase pingega võrgu omavaheliseks ühendamiseks (näiteks 154-kV võrgu ühendamisel 220-kV võrguga). Autotrafod leiavad kasutamist veel sünkroon- ja asünkroonmootorite käivitamisel ja vahelduvvoolu-kommutaatormasinate pöörlemiskiiruse reguleerimisel.

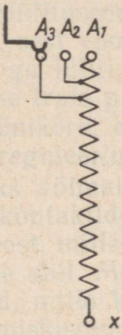
Mõnikord tekib vajadus pinge reguleerimiseks mõnes elektrivõrgu osas. Reguleerimine võib toimuda nii pinge amplituudi kui ka faasi osas. Siin kasutatakse erikonstruktsiooniga trafosid:

1) trafod, millega saab koormusel astmeliselt pinget reguleerida;

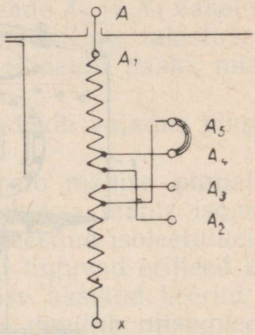
2) trafod, millega saab sujuvalt pinget reguleerida;

3) järjestikku võrku ühendatavad reguleerimistrafod.

Ekspluatatsiooni tingimustes tekib vajadus hoida sekundaarpinge teatud tasemel, kui primaarpinge muutub. Pinge astmelist reguleerimist on võimalik teostada trafo mähise keerdude arvu astmelise muutmise teel. Selleks varustatakse trafo mähis väljavõtetega (joon. 15-6). Väikese võimsusega standardsed jõutrafod



Joon. 15-6. Trafo mähis väljavõtetega



Joon. 15-7. Trafo mähis väljavõtetega keskel: *a* — mähise skeem; *b* — ümberlüliti

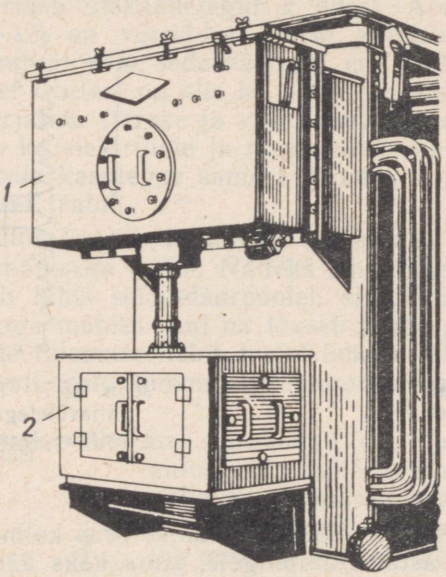
varustatakse tavaliselt sekundaarmähise osas kolme väljavõttega. Neist keskmine vastab nimipingele, kuna kaks äärmist vastavad $\pm 5\%$ keskmisest erinevale pingele. Suurema võimsusega jõutrafod varustatakse viie väljavõttega, pinge reguleerimiseks $\pm 2{,}5\%$ ja $\pm 5\%$ ulatuses.

Väiksema võimsusega trafode puhul teostatakse väljavõtted mähise lõpus, suurema võimsusega trafodel aga mähise keskel (joon. 15-7). Mähise keskel asuvate väljavõtete korral on lühise puhul mähises tekkivad jõud väiksemad kui mähise lõpus asuvate väljavõtete korral. Tänapäeval on trafod varustatud vastava lülitiga väljavõtete ümberlülitamiseks. Lüliti asub tavaliselt trafo paagis ja tema käepide on välja toodud trafo kasti kaanele. Ümberlülitamine toimub ainult siis, kui trafo on nii primaar- kui ka sekundaarpoolel võrgust lahutatud. Vastasel korral võib lüliti põhjustada ümberlülitatavate mähise osade lühist ja vooluahela

katkemist. Niisugune lüliti ei ole ette nähtud voolu all oleva trafo lülitamiseks.

Tänapäeva suurtes elektroenergeetilistes süsteemides on raske hoida pinget igal pool vajalikul tasemel, sellepärast osutub vajalikuks pinge pidev reguleerimine.

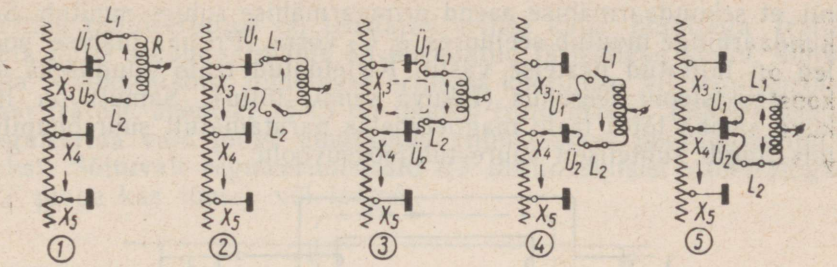
Selleks kasutatakse trafosid, millega on võimalik väljavõtteid ümber lülitada trafo koormusel, tarbija varustamist katkestamata. Selline trafo on varustatud keerukama konstruktsiooniga lülitiga. Et vältida lühisvoolude tekkimist lülitamisel lühistatavates mähiseosades, piiratakse voolusid lülitamisahelasse ühendatavate paispoolide või takistite abil. Niisugusel juhul asetatakse lüliti õliga täidetud eraldi paaki, kusjuures lülitamisseade automatiseeritakse. Joonisel 15-8 on näidatud sellise lüliti asetus trafo paagil.



Joon. 15-8. Koormusel pinge reguleerimise aparatuuri asetus trafo paagil:
1 — lülitite õlipaak; *2* — ajami õlipaak

Joonisel 15-9 on toodud skeem, kus voolu piiramiseks leiab kasutamist paispool.

Asend *1* vastab ümberlülitamisseadme töö asendile harul X_3. Ümberlülitamisseade koosneb paispoolist *P*, kahest lülitist L_1 ja L_2 ning kahest ümberlülitist $Ü_1$ ja $Ü_2$. Tööasendis (asend *1* ja *5*) läbib vool kahte paispooli poolt vastassuundades, mistõttu paispooli induktiivne takistus on praktiliselt null. Üleminek ühelt harult (X_3) teisele (X_4) toimub vastavalt asenditele *1-2-3-4-5*. See-



Joon. 15-9. Koormusel trafo mähise ümberlülitamine paispooliga

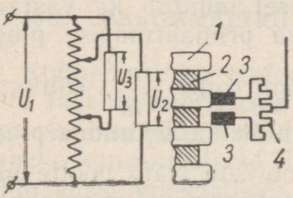
juures enne, kui lahutatakse ümberlüliti U_1 või U_2, lahutatakse need võrgust lülititega L_1 või L_2. Vahepealses asendis (asend *3*) ei teki ümberlülitusseadme ahelas ja mähise osade X_3 ja X_4 vahel tugevat voolu, sest voolu piiratakse paispooli induktiivse takistusega.

Kogu lüliti asetatakse eraldi õliga täidetud paaki, mis kinnitatakse trafo paagi külge (joon. 15—8).

Mõnikord, eriti väikestel võimsustel tekib vajadus pinge sujuvaks reguleerimiseks.

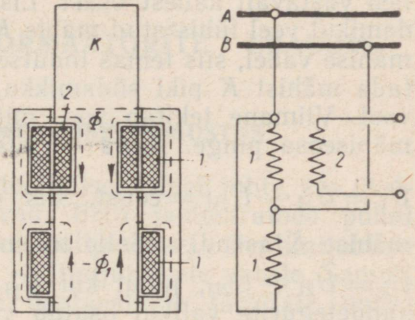
Üks võimalikest lahendustest on trafo mähise pinnal libisevate kontaktide kasutamine. Selleks tehakse mähis isoleerimata juhtmest, mille keerud on üksteisest isoleeritud isoleerainest vahekihtide abil. Mähise isoleerimata pinnal liiguvad erilised kontaktharjad, mille kaudu ühendatakse mähise üksikud keerud mähise väljumisklemmiga (joon. 15-10). Pinge muutub niisugusel juhul väikeste, umbes 1 V astmete kaupa. Sellise ehitusega on näiteks teatrilava valgustuse reguleerimiseks kasutatav trafo.

Pinge sujuv reguleerimine on võimalik ka nihutatava sekundaarmähisega trafo abil (joon. 15-11). Trafo keskmisel sambal asub sekundaarmähis *2*. Seda sammast on võimalik nihutada,



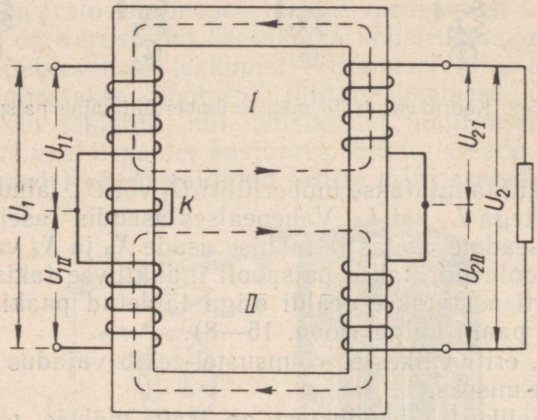
Joon. 15-10. Pinge sujuv reguleerimine libiseva kontaktharjaga

1 — mähise keerud; *2* — isolatsioon; *3* — kontaktharjad; *4* — voolu piirav takisti



Joon. 15-11. Nihutatava sekundaarmähisega trafo

nii, et sekundaarmähise asend primaarmähise suhtes muutub. Sekundaarpinge muutub seejuures $\pm U_2$ võrra. Primaarmähise pooled on lülitatud üksteise vastu. Kirjeldatud trafo puuduseks on konstruktsiooni keerukus (liikuva samba tõttu). Samuti on liikuva samba tõttu trafo magnetahelas paratamatult suur õhupilu, mis tingib suhteliselt suure tühijooksuvoolu.

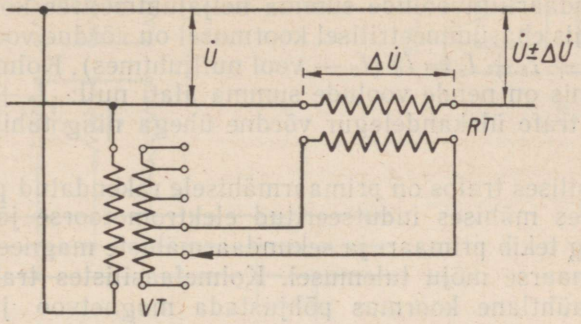


Joon. 15-12. Liikuva lühistatud mähisega reguleerimistrafo

Pinget on võimalik sujuvalt reguleerida ka trafo abil, millel on liikuv lühistatud lisamähis K (joon. 15-12). Trafo primaarmähised on ühendatud järjestikku ning vastassuunaliselt. Seega on tegemist nagu kahe eraldi trafoga samal südamikul. Iga mähise osa magnetvoog läbib südamiku akna. Ka sekundaarmähis koosneb vastavalt kahest osast. Lisaks nimetatud mähistele asub südamikul veel lühistatud mähis K. Kui see mähis asub keskel, kahe mähise vahel, siis temas indutseeritud emj. on null. Kui aga nihutada mähist K piki südamikku, indutseerub temas emj. ja tekib vool. Viimane tekitab voo, mille tulemusel muutub ka vastava mähiseosa pinge. Kuna võrgust toidetava primaarmähise pinge $\dot{U}_1 = \dot{U}_{1I} + \dot{U}_{1II} = \text{const}$, siis muutub vaid suhe $\frac{U_{1I}}{U_{1II}}$, sõltuvalt mähise K asendist. Selle tulemusena muutub ka sekundaarpinge $\dot{U}_2 = \dot{U}_{2I} + \dot{U}_{2II}$, juhul kui $U_{1I} \neq U_{1II}$. Sobivate trafo poolte ülekandetegurite valikul osutub võimalikuks koormusel reguleerida sekundaarpinget suurtes piirides. Ka selle reguleerimistrafo puuduseks on suur tühijooksuvool ja pingelang.

Elektrivõrkudes tekib mõnikord vajadus reguleerida pinget võrgu üksikutes punktides nii amplituudi kui ka faasi poolest.

Selline reguleerimine on teostatav erilise kahe mähisega trafo abil, mille sekundaarmähis on ühendatud järjestikku võrku, kuna aga primaarmähist toidetakse erilisest koormuse all reguleeritavast trafost. Joonisel 15-13 on toodud trafo skeem, millega saab reguleerida vaid pinge amplituudi (nimetatakse pikireguleerimiseks). Sõltuvalt reguleerimistrafo *RT* ühendusviisist vahetrafoga *VT* pinge kas tõuseb või langeb.



Joon. 15-13. Järjestikku lülitatav reguleerimistrafo

Kui tahetakse reguleerida ka pinge faasi, siis tuleb kasutada erikonstruktsiooniga vahetrafot. Selline reguleerimisseade on suhteliselt kallis ja keerukas ning leiab harva kasutamist. Teda kasutatakse vahel kinniste elektrivõrkude aktiivsete ja reaktiivsete voolude jaotuse reguleerimisel.

XVI PEATÜKK

KOLMEFAASILISTE TRANSFORMAATORITE EBASÜMMEETRILINE KOORMUS

16-1. EBASÜMMEETRILISE KOORMUSE ISELOOMUSTUS

Kolmefaasiliste trafode ekspluateerimisel esineb juhte, kus üksikute faaside koormused on erinevad. Eriti jaotustrafode puhul ühendatakse hõõglambid faasipingele nulljuhtme ja ühe liinijuhtme vahele, kuna mootorid liinipingele — liinijuhtmete vahele. Samuti tekib ebasümmeetrilisus võimsate ühefaasiliste tarbijate puhul (näit. elektriahjud, raudteed).

Praktikas on tähtis osata hinnata ebasümmeetrilise koormuse mõju trafo faasi- ja liinipingetele. Faasi- ja liinipingete ebasümmeetrilisus põhjustab hõõglampide kiiret läbipõlemist liiga kõrge pinge puhul või valgusvoo vähenemist pinge alanemisel. Ebasüm-

meetriline pingete süsteem vähendab kadude suurenemise tõttu kolmefaasiliste mootorite võimsust.

Suur tähtsus ekspluatatsiooni seisukohalt on ka ebasümmeetrilistel lühistel. Selliste lühiste tundmine on vajalik elektrivõrkude kaitseseadiste õige töötamise tagamiseks.

Käsitledes allpool trafode ebasümmeetrilisi režiime, oletame, et primaarliinipingete süsteem on sümmeetriline: $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$. Sekundaarliinivoolude summa neljajuhtmelises kolmefaasilises süsteemis ebasümmeetrilisel koormusel on võrdne vooluga nulljuhtmes: $I_a + I_b + I_c = I_0$ (I_0 — vool nulljuhtmes). Kolmejuhtmelises süsteemis on nende voolude summa alati null: $I_a + I_b + I_c = 0$. Olgu trafo ülekandetegur võrdne ühega ning tühijooksuvool tühine.

Ühefaasilises trafos on primaarmähisele rakendatud pinge tasakaalus selles mähises indutseeritud elektromotoorse jõuga, ning magnetvoog tekib primaar- ja sekundaarmähiste magneetimisergutuste summaarse mõju tulemusel. Kolmefaasilistes trafodes võib faaside ebaühtlane koormus põhjustada magnetvoo ja pingete moonutusi, mis on tingitud mähiste ühendusviisist ning magnetahela ehitusest.

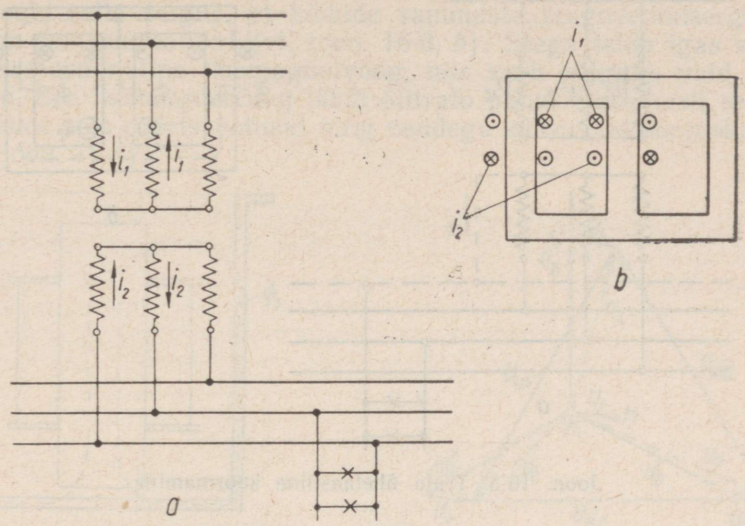
Järgnevalt vaatleme lähemalt üksikuid iseloomulikumaid juhtusid.

16-2. EBASÜMMEETRILINE KOORMUS VÄLJATOOMATA NULLJUHTMEGA TRANSFORMAATORIL

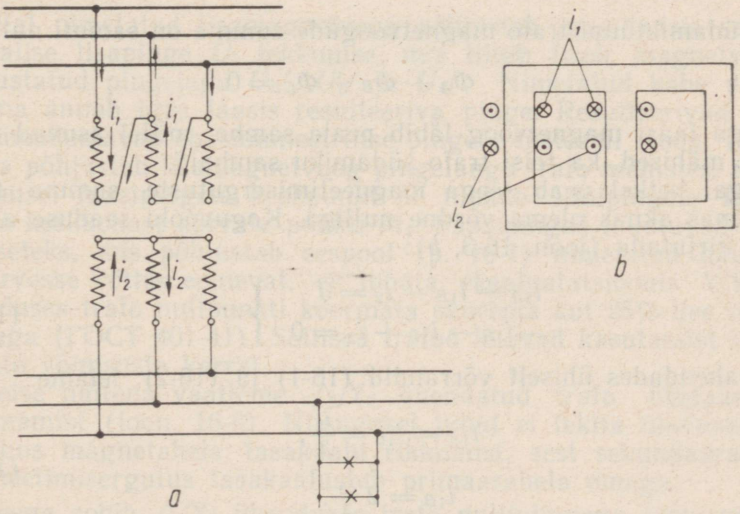
Kui lülitada tarbija Y/Y-12 ühenduses kolmefaasilise trafo kahe faasi vahele, tekib vool trafo kahes faasimähises nii sekundaar- kui ka primaarpoolel (joon. 16-1, *a*). Trafo magnetahela tasakaal seejuures ei muutu, kuna koormusvoolude i_1 ja i_2 magneetimisergutuste summa on null (joon. 16-1, *b*). Seetõttu ei muutu ka faasipingete tasakaal ja nad jäävad praktiliselt sümmeetrilisteks, kui ei arvestata tühiseid pingelange ja tühijooksuvoolu. Analoogiline olukord tekib trafo primaarmähise ühendamisel kolmnurka. Ka sel juhul jääb magnetahela tasakaal püsima ning pinged jäävad sümmeetriliseks (joon. 16-2, *a* ja *b*).

16-3. EBASÜMMEETRILINE KOORMUS VÄLJATOODUD NULLJUHTMEGA TRANSFORMAATORIL

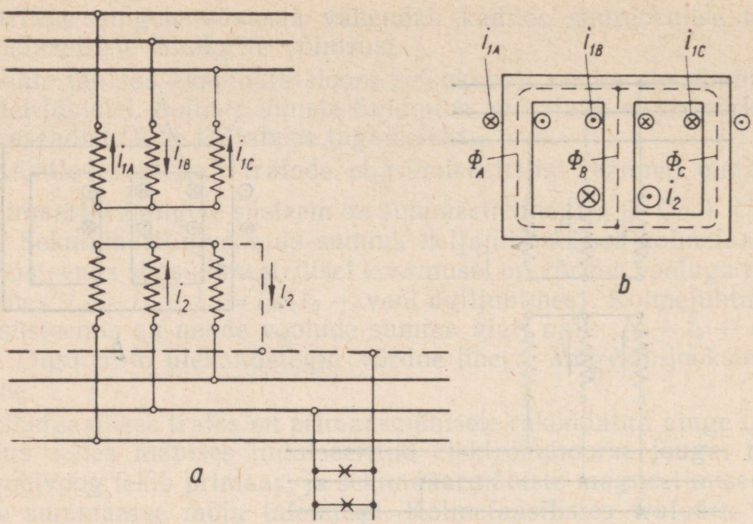
Olgu trafo ühendusgrupp Y/Y_0-12. Ühefaasiline koormus sekundaarpoolel põhjustab voolu primaarmähise kõikides faasides (joon. 16-3).



Joon. 16-1. Kahefaasilise Y/Y ühenduses trafo koormamine



Joon. 16-2. Kahefaasilise △/Y ühenduses trafo koormamine



Joon. 16-3. Trafo ühefaasiline koormamine

Kuna primaarmähis on ühendatud tähte ja nulljuhe puudub, siis peab primaarvoolude summa olema null:

$$i_{1A} - i_{1B} + i_{1C} = 0. \tag{16-1}$$

Südamiktüüpi trafo magnetvoogude summa on samuti null:

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0.$$

Iga faasi magnetvoog läbib peale samba, millel asuvad selle faasi mähised, ka teisi trafo südamiku sambaid.

Igal hetkel peab seega magneetimisergutuste summa trafo mõlemas aknas olema võrdne nulliga. Koguvoolu seaduse alusel võib kirjutada (joon. 16-3, *b*):

$$\left.\begin{aligned} i_{1A} + i_{1B} - i_2 &= 0 \\ -i_{1B} - i_{1C} + i_2 &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{16-2}$$

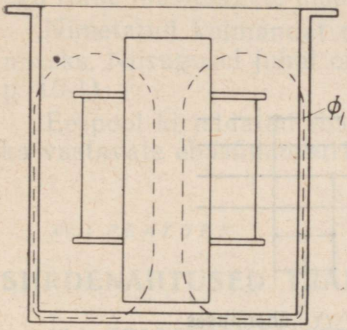
Lahendades ühiselt võrrandid (16-1) ja (16-2), leiame:

$$\left.\begin{aligned} i_{1A} &= i_{1C} = \frac{i_2}{3}, \\ i_{1B} &= 2\,\frac{i_2}{3}. \end{aligned}\right\} \tag{16-3}$$

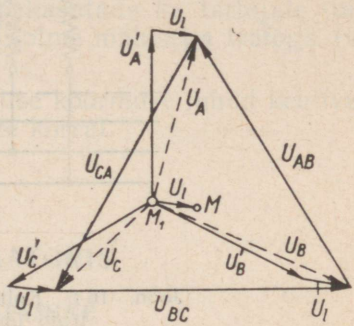
Vaadeldes eraldi iga südamiku sammast, selgub, et nii äärmiste kui ka keskmise samba resulteeriv magneetimisergutus on võrdne ühe kolmandikuga sekundaarahela magneetimisergutusest

$$i_{1B} - i_2 = 2\frac{i_2}{3} - \frac{i_2}{3} = \frac{i_2}{3}.$$

Peale selle selgub, et kõikide sammaste magneetimisergutused on samasuunalised (vt. joon. 16-3, *b*). Seega tekib igas sambas samasuunaline lisamagnetvoog, mis saab sulguda vaid õhu kaudu. See lisamagnetvoog läbib õlitrafo puhul trafo kasti seinu, tekitades neis pöörisvoolusid ning nendega kaasuvaid soojuskadusid (joon. 16-4).



Joon. 16-4. Ühefaasiline lisamagnetvoog trafos ebasümmeetrilisel koormusel



Joon. 16-5. Pingete süsteem ebasümmeetrilisel koormusel

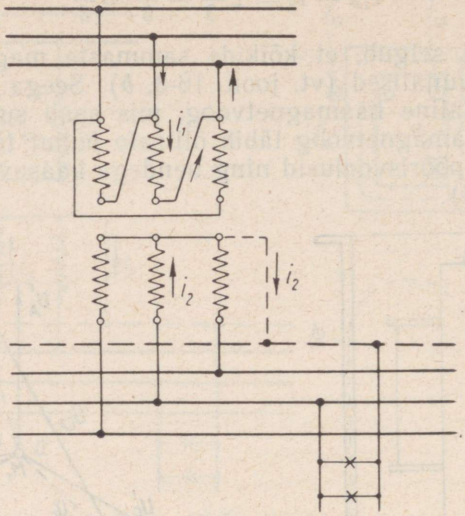
Ülal nimetatud lisamagnetvoog põhjustab igas faasis samasuunalise lisapinge U_l tekkimise, mis liitub faasi magnetvoost põhjustatud pingetega U_A', U_B' ja U_C'. Nimetatud kahe pinge summa annab igas faasis resulteeriva pinge. Resulteerivad pinged moodustavad ebasümmeetrilise pingete süsteemi (joon. 16-5). Seega põhjustab lisamagnetvoog pingelangu trafo mähistes, mille tulemusel faasipingete keskpunkt M nihkub liinipingete kolmnurga keskkohast kõrvale punkti M_1. Faasipinged muutuvad ebavõrdseteks, mis põhjustab eespool (p. 16-1) nimetatud häireid.

Arvesse võttes eelnevat, ei lubata ekspluatatsioonis Y/Y_0-12 ühenduses trafo nullpunkti koormata suurema kui 25%-lise nimivooluga (ГОСТ 401-41). Sellised trafod leiavad kasutamist väiksemate võimsuste korral.

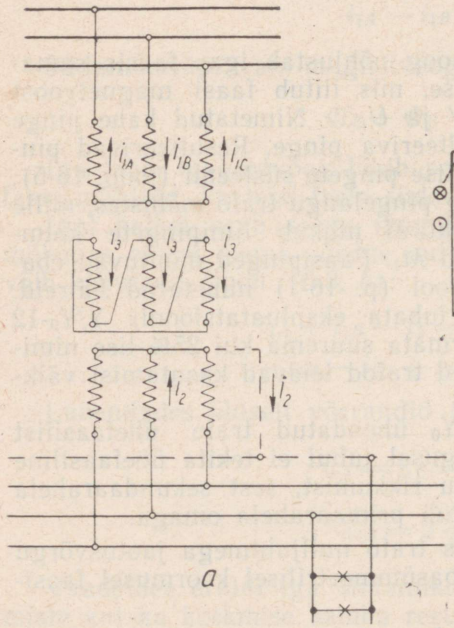
Teise näitena vaatleme $\triangle/Y_0$ ühendatud trafo ühefaasilist koormamist (joon. 16-6). Niisugusel juhul ei tekita ühefaasiline koormus magnetahela tasakaalu rikkumist, sest sekundaarahela magneetimisergutus tasakaalustub primaarahela omaga.

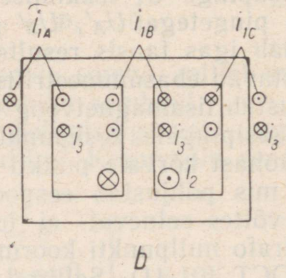
Seega sobib $\triangle/Y_0$ ühenduses trafo nulljuhtmega jaotusvõrgu toitmiseks, sest temas ei teki ebasümmeetrilisel koormusel faasipingete moonutumist.

Y/Y_0 ühenduses oleva trafo faasipingete moonutust ebasüm-



Joon. 16-6. Kolmefaasilise △/Y ühenduses trafo ühefaasiline koormus





Joon. 16-7. Kolmefaasiline Y/Y ühenduses trafo kolmnurka ühendatud lisamähisega

meetrilisel koormusel on võimalik vältida, kui varustada trafo kolmanda, kolmnurka ühendatud mähisega (joon. 16-7).

Sellised trafod leiavad kasutamist suuremate võimsuste puhul, näiteks kui on vaja ühendada 220/110-kV võrgud omavahel.

On võimalik näidata, et $i_{1A} = i_{1C} = \frac{i_2}{3}$; $i_{1B} = 2\frac{i_2}{3}$ ja $i_3 = i_{1A} = i_{1C}$. Ka siin osutub resulteeriv magneetimisergutus iga samba kohta võrdseks nulliga. Seega ei teki siin lisamagnetvoogu ega esine faasipingete moonutust.

Nimetatud kolmandat mähist võib kasutada ka tarbijate toitmiseks. Niisugusel juhul on tegemist kolme mähisega trafoga (vt. p. 15-1).

Eespool kirjeldatud ebasümmeetrilise koormuse juhud kehtivad ka vastavate ebasümmeetriliste lühiste korral.

XVII PEATÜKK

SIIRDENÄHTUSED TRANSFORMAATORIS

17-1. TRANSFORMAATORI SISSELÜLITAMINE

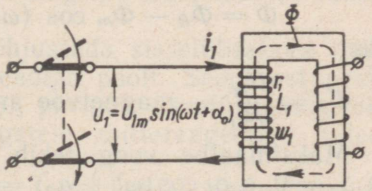
Igasugusel töötamisolukorra järsul muutumisel, nagu võrku sisselülitamisel, järsul koormuse muutumisel, lühisel, liigpingete sattumisel trafo mähistesse jne. tekivad trafos siirdenähtused.

Siirdenähtuste tulemusel tekivad trafos erakordselt tugevad voolud, neist tingitud suured mehaanilised jõud ja ülikõrged pinged. Kõiki neid nähtusi on tarvis arvestada, et õigesti projekteerida ning ekspluateerida trafosid.

Esmalt vaatleme lähemalt ühefaasilise trafo tühijooksul võrku sisselülitamisel tekkivaid nähtusi.

Väljakujunenud tööolukorras on trafo tühijooksuvool nimivooluga võrreldes mõne protsendi suurune (väikeste trafode tühijooksuvool võib olla ka 10% ja rohkem nimivoolust). Kuid võrku sisselülitamisel esineb lühiajaline siirdenähtus, mille jooksul magneetimisvool võib kasvada järsult, ületades mitmekordselt mähise nimivoolu.

Sisselülitamise protsessi selgitamiseks koostame joonisel 17-1 näidatud skeemi kohta pingete tasakaalu võrrandi. Seejuures oletame, et primaarmähise induktiivsus L_1 on konstantne, mis on võimalik siis, kui trafo südamiku magnetiline läbitavus μ on samuti jääv suurus. Olgu voog Φ aheldatud kõikide mähise keerdudega. Nii



Joon. 17-1. Ühefaasilise trafo võrku lülitamine tühijooksul

tekib trafo mähises sisselülitamisel endainduktsiooni emj. e_1. Vool primaarahelas avaldub seega igal hetkel valemiga

$$i_1 = \frac{U_1 + e_1}{r_1}. \tag{17-1}$$

Kuna endainduktsiooni emj.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

siis selle avaldise asetamisel valemisse (17-1) saame:

$$i_1 = \frac{U_1 - w_1 \frac{d\Phi}{dt}}{r_1}.$$

Sellest seosest

$$U_1 = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Eeldades, et võrgupinge, millele trafo lülitatakse, on siinuseline: $U_1 = U_m \sin(\omega t + \alpha_0)$ (α_0 — pinge faasi nurk sisselülitamise hetkel), omandab viimane valem järgmise kuju:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha_0) = i_1 r_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Kui oletada veel, et mähise aktiivtakistus on võrdne nulliga ($r_1 \approx 0$), saame:

$$U_m \sin(\omega t + \alpha_0) = w_1 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Avaldades sellest võrdusest $d\Phi$, leiame:

$$d\Phi = \frac{U_m}{w_1} \sin(\omega t + \alpha_0)\, dt.$$

Integreerides mõlemaid pooli ja arvestades seda, et alghetkel ($t = 0$) on trafos jääkmagnetvoog Φ_R, saame:

$$\Phi = \Phi_R - \frac{U_m}{\omega w_1} \cos(\omega t + \alpha_0) + \frac{U_m}{\omega w_1} \cos \alpha_0$$

ehk

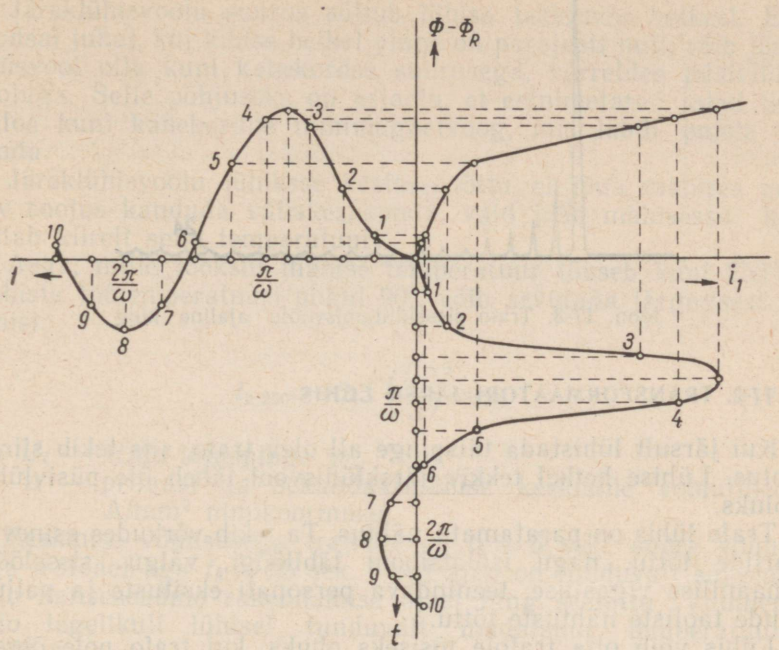
$$\Phi = \Phi_R - \Phi_m \cos(\omega t + \alpha_0) + \Phi_m \cos \alpha_0, \tag{17-2}$$

kus

$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega w_1}$ — magnetvoo amplituud.

Maksimaalne voog tekib sisselülitamise hetkel, kui $\omega t = \pi$ ja $\alpha_0 = 0$, s. o. $\cos(\omega t + \alpha_0) = -1$ ning kui jääkväli liitub tekkiva vahelduva väljaga. Sel juhul magnetvoo amplituud

$$\Phi_m = \Phi_R + 2\Phi_m. \tag{17-3}$$



Joon. 17-2. Trafo sisselülitamisvoolu määramine

Sisselülitamisel tekkiva voolu leiame graafiliselt trafo magneetimiskõvera $\Phi = f(i_1)$ abil (joon. 17-2).

Joonisel 17-2 toodud graafilisest konstruktsioonist selgub, et sisselülitamisvool on seda tugevam, mida enam on trafo magnetahel küllastunud.

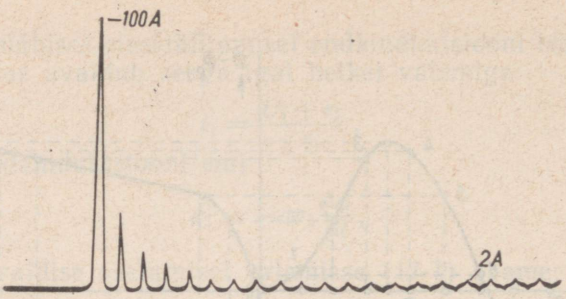
Nagu kogemused näitavad, võib sisselülitamisvool ulatuda 10 . . . 20-kordse nimivooluni.

Joonisel 17-2 saadud voolu i_1 kõvera puhul ei ole arvesse võetud primaarmähise aktiivtakistust r_1.

Sisselülitamisvoolu tegelik kulgemine on näha joonisel 17-3. Voolu täielikuks sumbumiseks võib kuluda (eriti võimsate trafode puhul) kuni 20 sekundit. See on tingitud trafo mähise suhteliselt suurest induktiivsusest.

Selline suur voolutõuge võib põhjustada sisselülitatava trafo uuesti väljalülitamise trafo kaitseseadme poolt. Seepärast peab, eriti suure võimsusega trafode puhul, piirama sisselülitamisvoolu mõju. Seda saavutatakse voolutõugetele mittereageeriva releekaitse kasutamisel.

Eeltoodu on maksev ühefaasilise trafo kohta. Kolmefaasilise trafo sisselülitamisel esineb igas faasis sama olukord ning tekkiva siirdeprotsessi iseloom oleneb sisselülitamise hetkest.



Joon. 17-3. Trafo sisselülitamisvoolu ajaline kulg

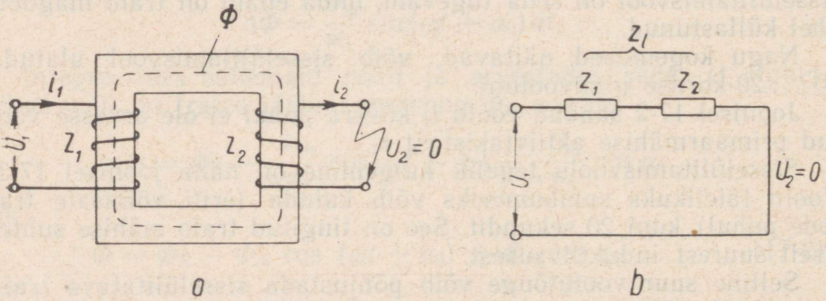
17-2. TRANSFORMAATORI JÄRSK LÜHIS

Kui järsult lühistada täispinge all olev trafo, siis tekib siirdenähtus. Lühise hetkel tekkiv järsklühisvool läheb üle püsivlühisvooluks.

Trafo lühis on paratamatu nähtus. Ta tekib võrkudes esinevate avariide tõttu, nagu isolatsiooni läbilöögi, välgu sisselöögi, mehaanilise vigastuse, teenindava personali eksituste ja paljude muude taoliste nähtuste tõttu.

Lühis võib olla trafole tõsiseks ohuks, kui trafo pole õigesti konstrueeritud, sest tugev vool põhjustab mähiste ülemäärase kuumenemise. Teiseks mõjuvad tugeva voolu tõttu mähistele suured mehaanilised jõud, mis võivad mähise isegi purustada.

Trafo lühist käsitlesime ühefaasilise trafo puhul, kuid kolmefaasilises trafos toimub lühis üldjoontes samasuguselt. Joonisel 17-4 on toodud trafo skeem lühisel ning sellele vastav aseskeem.



Joon. 17-4. Trafo skeem (*a*) ja tema aseskeem (*b*) lühisel

Lühise puhul võime arvestamata jätta magneetimisvoolu.

Siit järeldub, et lühisel on seosed mõningal määral analoogilised eelmises punktis toodud seostega. Ka järsklühisvoolu suurus on umbes sama mis sisselülitamisvoolul tühijooksul.

Järsklühisvoolu suurus sõltub lühise tekkimise hetkest. Ebasoodsal juhul, kui lühise hetkel pinge on parajasti null, võib järsklühisvool olla kuni kahekordse suurusega, võrreldes püsivlühisvooluga. Selle põhjuseks on asjaolu, et eelnimetatud juhul tekib trafos kuni kahekordne nimimagnetvoog, mis läbib puiste teekonda.

Järsklühisvoolu lühikese kestuse tõttu ei jõua mähises eralduv soojus kanduda väliskeskkonda, vaid jääb mähisesse ning tõstab kiirelt selle temperatuuri.

Aega, mille jooksul mähise temperatuur tõuseb kuni 250°-ni, mähiste töötemperatuuri puhul 90°, võib arvutada järgmisest valemist:

$$t_{k\,250°} \approx 2{,}5 \left(\frac{U_l}{\Delta}\right)^2 \text{ sec}, \qquad (17\text{-}4)$$

kus U_l — trafo lühispinge %,

Δ — primaar- ja sekundaarmähise keskmine voolutihedus A/mm² nimikoormusel.

Keskmise võimsusega trafodel on $t_k \approx 6$ sek., suure võimsusega trafodel aga $t_k \approx 25$ sek. Need ajad on tunduvalt suuremad trafo kaitseseadme rakendamise ajast ning seetõttu kuumeneb trafo tegelikult lühisel tunduvalt madalama temperatuurini kui 250°.

Nagu teada, sõltub vooluga juhtmele mõjuva mehaanilise jõu suurus magnetilisest induktsioonist ning voolust juhtmes. Ühele pikkusühikule mõjuv jõud

$$F = 0{,}102\, Bi \text{ kg/m}.$$

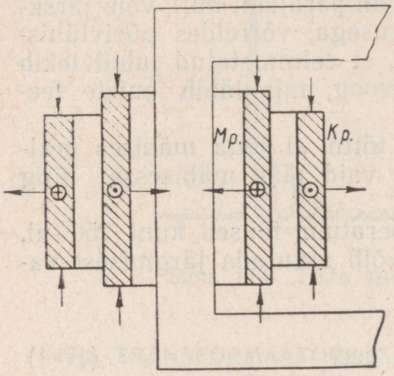
Trafo nimikoormusel on see jõud väike ega kujuta mingit ohtu trafo mähisele. Kuid lühisel on see jõud suur ja teda võib lugeda võrdeliseks voolu ruuduga (i^2) mähises, sest induktsiooni B võib lugeda võrdeliseks vooluga i, kui ei arvesta magnetahela küllastust.

Seega, kui lühisel vool kasvab nimivooluga võrreldes näiteks 30 korda, siis jõud kasvab $30^2 \approx 1000$ korda. On arusaadav, et selline jõud võib mähist kindlasti deformeerida, halvemal juhul isegi purustada.

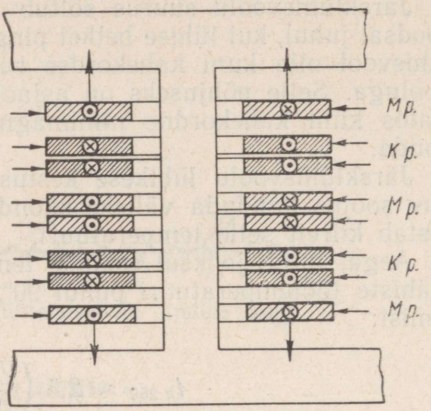
Nimetatud jõudude täpne arvutamine on seotud raskustega, sest on tülikas määrata induktsiooni jaotust trafo mähiste läheduses.

Teades vooluga juhtmetele mõjuvate jõudude suunda, ei ole raske ette kujutada trafo mähistele mõjuvate jõudude iseloomu.

Joonisel 17-5 on toodud silindriliste mähistega trafole mõjuvate jõudude skeem. Nagu selgub, püüavad jõud mõlemat mähist telje suunas kokku suruda. Radiaalselt mõjuvad jõud aga püüavad välise mähise laiali tõmmata, sisemist aga kokku suruda.



Joon. 17-5. Silindrilisele mähisele mõjuvad mehaanilised jõud



Joon. 17-6. Ketasmähisele mõjuvad mehaanilised jõud

Joonisel 17-6 on antud ketasmähisele mõjuvate jõudude skeem. Siin on ohustatud äärmised (ikke juures olevad) kettad.

Trafode konstrueerimisel tuleb eeltoodud jõududega arvestada ja mähised nende jõudude vastuvõtmiseks vastavalt kinnitada ning toetada. Ühepoolselt mõjuvate jõudude tekkimise vältimiseks peavad mähised asetsema nii üksteise kui ka trafo südamiku suhtes sümmeetriliselt.

17-3. LIIGPINGETEST TINGITUD SIIRDENÄHTUSED TRANSFORMAATORIS

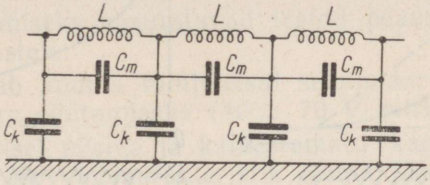
Elektrivõrgu seisukorra järsud muutused, nagu lülitamisoperatsioonid, lühised, maaühendused, samuti looduses äikese näol esinevad elektrilaengud, põhjustavad liigpingete tekkimise. Sellised liigpinged levivad mööda juhtmeid ja võivad sattuda trafosse. Kuna liigpingete liikumissuuna poole pööratud laup on järsk ja kõrge, siis, sattudes trafosse, muudab liigpinge järsult selle mähise pingejaotust. Nagu näitavad kogemused, on äikese poolt tekitatud liigpinged kõige ohtlikumad.

Liigpingetega seotud protsessid kulgevad väga kiirelt ning neid võib seepärast vaadelda kui väga kõrge sagedusega võnkumisi. Sel puhul muutub trafo mähise induktiivne takistus väga suureks, kuna aga mahtuvuslik takistus väheneb.

Mahtuvus esineb trafos mähise kõrvuti asuvate keerdude, kahe kõrvuti asuva mähise ja mähise ning terassüdamiku vahel.

Liigpinge sattumisel trafosse tekib kõigepealt vool trafo mahtuvustes, s. o. lähestikku asuvate mähiste ning mähise ja südamiku vahelistes mahtuvustes.

Trafo elektriline aseskeem liigpingete puhul kujuneb seega selliseks, nagu näha joonisel 17-7. Harilikult ei võeta arvesse mähiste aktiivtakistusi.



Joon. 17-7. Trafo aseskeem liigpingete esinemise puhul:
L — mähiseosa induktiivsus; C_m — kõrvuti asuvate mähise keerdude vaheline mahtuvus; C_k — mähise ja südamiku vaheline mahtuvus

Liigpinge trafo mähisesse sattumise esimesel hetkel jaotub pinge mähise pikkuse (telje) sihis ebaühtlaselt, kusjuures trafo mähise esimestele keerdudele langeb suurem osa (umbes 80%) pingest. Seetõttu võib kergesti trafo mähise esimeste keerdude isolatsioon saada läbi löödud, sest ta satub normaalsest mitu korda kõrgema pinge alla.

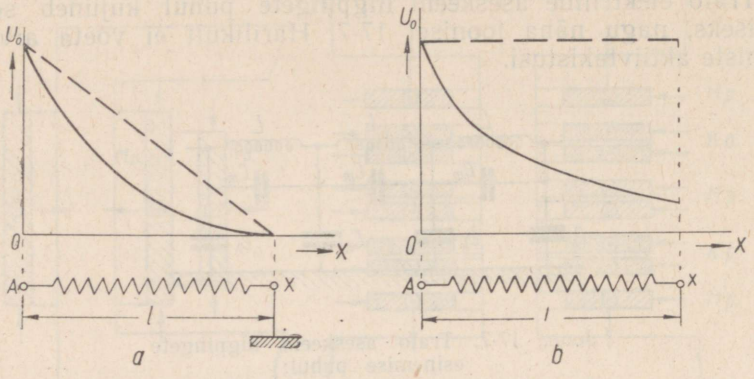
Kui ei oleks mahtuvusi südamiku suhtes (C_k) ning kui lugeda kõik mähise keerdudevahelised mahtuvused (C_m) omavahel võrdseks, saaksime ühtlase pinge jaotuse kogu mähise ulatusel.

Vastupidi, kui mahtuvused oleksid vaid mähise keerdude vahel (C_m), siis läbiks vool mähise alguses olevat esimest mahtuvust. See tähendab aga seda, et peaaegu kogu pinge rakendub esimesele mähise keerule.

Pinge esialgne jaotus ning selle edaspidine kujunemine sõltub trafo mähise nullpunkti maandamisest. Joonisel 17-8 on näha pinge esialgne jaotus piki mähist maandamata ja maandatud nullpunktiga trafo puhul.

Mõne aja möödumisel liigpinge sattumisest trafo mähisesse omandab pinge jaotus mähises lõpliku iseloomu. Maandatud nullpunkti korral jaotub pinge ühtlaselt, vähenedes piki mähist. Maandamata nullpunkti puhul omandab kogu mähis ühesuuruse pinge (potentsiaali) (vt. punktiiriga näidatud jaotus joon. 17-8, *a* ja *b*).

Seega võib liigpinge mähisesse tungimist vaadelda esialgsest pingejaotusest lõplikku siirdumise protsessina. Selline siirdeprotsess on seotud sumbuvate elektromagnetiliste võnkumiste tekkimisega, sest trafo mähis omab induktiivsust, mahtuvust ja aktiivtakistust. Selle protsessi vältel võib pinge tõusta väga kõrgeks (liigpingest isegi kõrgemaks), mis ohustab mähise isolatsiooni.



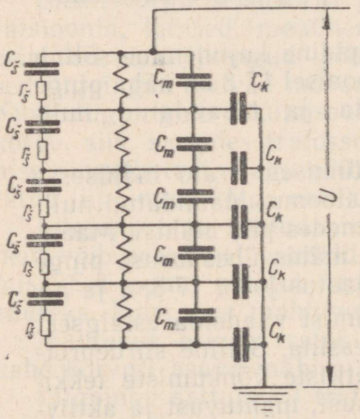
Joon. 17-8. Pinge esialgne jaotus trafo mähises liigpinge sissesattumise puhul:

a — maandatud nullpunkti puhul, *b* — maandamata nullpunkti puhul. Täisjoonega — esialgne pinge jaotus, kriipsjoonega — lõplik pinge jaotus

Et kaitsta trafot kirjeldatud nähtuste vastu, ei tohi lubada trafosse liiga kõrgete pingete sattumist ning tuleb muuta ühtlasemaks algul esinevat ebaühtlast pinge jaotust.

Esimese nõude täitmiseks kaitstakse trafo alajaamu maandatud kaitsetrosside ning liigpingelahendajate abil.

Teise nõude täitmiseks on lihtsaim abinõu «mahtuvusrõngaste» kasutamine (joon. 17-9). Viimased on lahtilõigatud rõngataolised elektrostaatilised ekraanid mähise väljumisotste läheduses. Nad ühtlustavad elektrivälja ning muundavad seega esialgse pingejaotuse ühtlasemaks.



Joon. 17-9. Osalise mahtuvusliku kaitsega skeem

Veel paremaid tagajärgi annavad erilised silindrilised metallekraanid osa mähise poolide ümber.

Nii ehitatud trafosid nimetatakse mittevõnkuvateks. Tänapäeval on suure võimsusega trafod kõik sellise konstruktsiooniga.

Üks selline skeem on näidatud joonisel 17-9. Lisakondensaatoritega C_1 on järjestikku ühendatud aktiivtakistus r_s. See võimaldab vältida resonantsinähtuste tekkimist trafo mähise osade ning kaitsemahtuvuste vahel. Sünteerivad mahtuvused saadakse eriliste metallplaatide abil, mis asuvad kanalites, mähiste vahel.

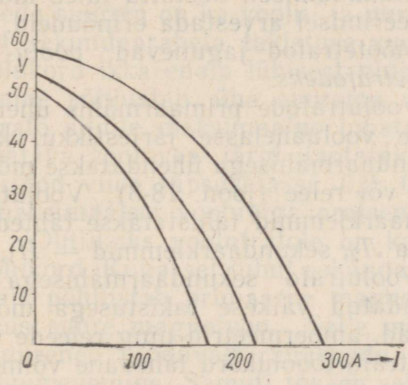
ERIOTSTARBELISED TRANSFORMAATORID

18-1. KEEVITUSTRANSFORMAATORID

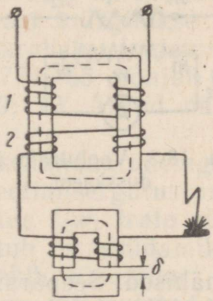
Kaarkeevitamiseks kasutatavad trafod peavad vastama järgmistele tingimustele:

1) trafo peab andma tühijooksul sekundaarpoolel pinge, mis on vajalik kaare süütamiseks (40 ... 70 V piirides);

2) keevitamisel püsiva ja katkestamatu kaarleegi saamiseks peab keevitustrafo väliskarakteristik olema järsult langev. See tagab keevitustrafole iseloomuliku katkendliku tööviisi puhul (tühijooks vaheldub lühisega) suhteliselt väikesi voolumuutusi (joon. 18-1);



Joon. 18-1. Keevitustrafo väliskarakteristik



Joon. 18-2. Keevitustrafo paispooliga

3) keevitustrafo ahel peab olema suure induktiivsusega ($\cos\varphi = 0{,}4 \ldots 0{,}5$). See tagab samuti rahuliku ja katkematu kaarleegi.

Seepärast peab keevitustrafo omama suure puisteinduktiivsuse, mis ühtlasi piirab ka trafo lühisvoolu. Lühisvool peab olema väiksem kui kahekordne nimivool. Järelikult tuleb keevitustrafo vooluahelas induktiivset takistust kunstlikult suurendada.

Keevitustrafosid on konstruktsioonilt kahte liiki:

1. Trafod suurendatud magnetilise puistega. Niisugusel juhul asetatakse primaar- ja sekundaarmähis eraldi sammastele või samale sambale üksteise kõrvale. Trafod varustatakse puiste suurendamiseks magnetiliste šuntidega.

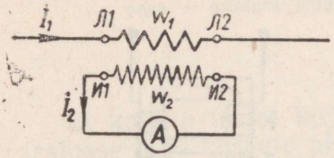
2. Trafod järjestikku ühendatud paispooliga (joon. 18-2).

Vastavalt keevitamisel kasutatava elektroodi läbimõõdule on vaja reguleerida keevitusvoolu tugevust. Seda teostatakse kas ülekandeteguri või paispooli mähise keerdude arvu muutmise teel. Samuti kasutatakse selleks otstarbeks trafo või paispooli magnetahela üksikute osade magnetilise takistuse muutmist. Joonisel 18-2 näidatud paispooliga keevitustrafo puhul reguleeritakse keevitusvoolu paispooli õhupilu δ muutmise teel.

18-2. MÕÕTETRANSFORMAATORID

Mõõtetrafode ülesandeks on: 1) mõõteriistade ja releede vooluahelate eraldamine kõrgepingest, ohutuse tagamiseks nende kasutamisel; 2) pinge või voolu mõõteulatuse laiendamine vahelduvvooluahelais.

Mõõtetrafod on väikese võimsusega, kuid peavad omama väikese vea pingete või voolude muundamisel. Seetõttu tuleb mõõtetrafode arvutamisel ja konstrueerimisel arvestada erinõudeid.



Joon. 18-3. Voolutrafo ühendusskeem

Mõõtetrafod jagunevad *voolu-* ja *pingetrafodeks*.

Voolutrafode primaarmähis ühendatakse vooluahelasse järjestikku, kuna sekundaarmähisega ühendatakse mõõteriist või relee (joon. 18-3). Voolutrafo primaarklemmid tähistatakse tähtedega $Л_1$ ja $Л_2$, sekundaarklemmid — $И_1$, $И_2$.

Voolutrafo sekundaarmähisega on ühendatud väikese takistusega mõõteriistad, ampermeetrid ning releede voolumähised. Seepärast on voolutrafo tööolukord lähedane võimsustrafo lühisele.

Eespool (p. 12-2) antud trafo voolude võrrandis

$$\dot{I}_1 = I_0 - \dot{I}_2',$$

on lühise puhul tühijooksuvool $\dot{I}_0$ tähtsusetu suurusega, võrreldes vooludega $\dot{I}_1$ ja $\dot{I}_2'$. Seepärast on voolude võrrand voolutrafos:

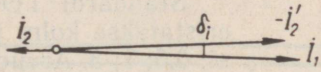
$$\dot{I}_1 \approx -\dot{I}_2' \text{ ehk } \dot{I}_1 \approx -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}. \qquad (18\text{-}1)$$

Keerdude arvu vahekord valitakse nii, et nimiprimaarvoolu korral on sekundaarvool 5 A (vahel ka 1 A). Mitu mõõteriista ühendatakse voolutrafo sekundaarahelasse järjestikku.

Voolutrafos esineb kahesugune viga: vooluviga ja nurgaviga. Eespool selgus, et voolud suhtuvad pöördvõrdeliselt mähiste keerdude arvuga, kui oletada, et tühijooksuvool on tühine. Tegelikult siiski tühijooksuvool esineb ning seetõttu voolude suhe ei vasta täpselt keerdude suhtele. Viimase asjaolu tõttu tekib vooluviga:

$$f_i\% = \frac{I_2 \frac{w_2}{w_1} - I_1}{I_1} \cdot 100\%. \qquad (18\text{-}2)$$

Tühijooksuvoolu tõttu ei ole primaar- ja sekundaarvool vastufaasis, vaid esineb faasinihe, mida iseloomustatakse nurgaveaga δ_i minutites (joon. 18-4).



Joon. 18-4. Voolutrafo vektordiagramm

Mida suurem on sekundaarahelasse järjestikku ühendatud mõõteriistade arv, seda suurem on sekundaarahela takistus, kuid seda suurem on ka voolu- ja nurgaviga. See on tingitud asjaolust, et sekundaarahela takistuse suurenemisel erineb voolutrafo tööolukord ikka enam lühisest ning tühijooksuvoolu arvestamatajätmine põhjustab üha suurema vea. Seepärast märgitakse voolutrafo sildile maksimaalne lubatav sekundaarahela takistus. Lubatava vooluvea järgi jaotatakse ГОСТ 7746-55 põhjal voolutrafod viide täpsusklassi: 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 10. Arvud näitavad maksimaalset vooluviga protsentides.

Ohtlikuks voolutrafole on katkestatud sekundaarahelaga tööolukord. Kuna sel juhul sekundaarne magneetimisergutus puudub, siis põhjustab primaarne magneetimisergutus $I_1 w_1$ trafo südamikus suure magnetvoo. Selle mõjul küllastub terassüdamik ning suureneb tunduvalt rauaskadu, mistõttu tekib südamiku ohtlik kuumenemine. Samuti tõuseb sekundaarpinge, mis suletud sekundaarahela puhul on madal, väga kõrgeks ning võib osutuda ohtlikuks inimestele.

Voolutrafode primaarmähis võib koosneda ühest või mitmest keerust. Voolutrafod võivad olla õhk- või õlijahutusega ja nad võivad omada mitut eraldi sekundaarmähist. Voolutrafod ehitatakse kõigile nimipingetele, mida rakendatakse elektriseadmeis, s. o. 0,5 . . . 400 kV.

Pingetrafode primaarmähis ühendatakse võrku paralleelselt, kuna sekundaarmähise klemmidele ühendatakse mõõteriistad (joon. 18-5). Kuna voltmeetri sisetakistus on suur, siis töötab pingetrafo võimsustrafo tühijooksule lähedases olukorras.

Teatavasti kehtib tühijooksul elektromotoorsete jõudude vahel järgmine seos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \qquad (18\text{-}2)$$

Siit järeldub, et pingetrafos on pingete suhe seda lähem tegelikule pingete suhtele, mida vähem on sekundaarmähis koormatud.

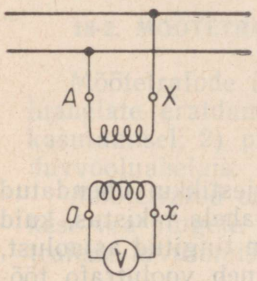
Pingetrafos tekib pingeviga

$$f_u\% = \frac{U_2 \frac{w_1}{w_2} - U_1}{U_1} \cdot 100\% \qquad (18\text{-}3)$$

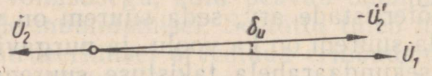
ning samuti nurgaviga δ_u (joon. 18-6).

Standardi ГОСТ 1983-43 kohaselt eristatakse kolm pingetrafo täpsusklassi: 0,5; 1; 3. Arvud näitavad maksimaalset pingeviga protsentides.

Mitu mõõteriista ühendatakse sekundaarmähise külge üksteisega paralleelselt. Antud täpsusklassile lubatav pin-



Joon. 18-5. Pingetrafo ühendusskeem



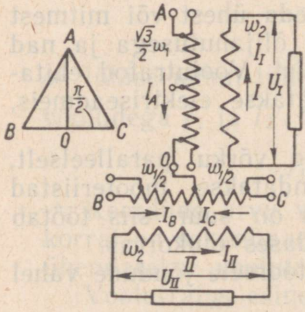
Joon. 18-6. Pingetrafo vektordiagramm

getrafo sekundaarkoormus VA-tes on märgitud pingetrafo sildile.

Pingetrafod ehitatakse õhk- ja õlijahutusega, pingetele 0,4 ... 400 kV.

18-3. TRANSFORMAATORID FAASIDE ARVU MUUTMISEKS

Esineb juhtumeid, kus tekib vajadus pinge muundamisel muuta ka faaside arvu (näiteks elektriahjude toitmisel, alaldamise puhul jne.). Faaside arvu saab muuta eriotstarbeliste trafode abil.



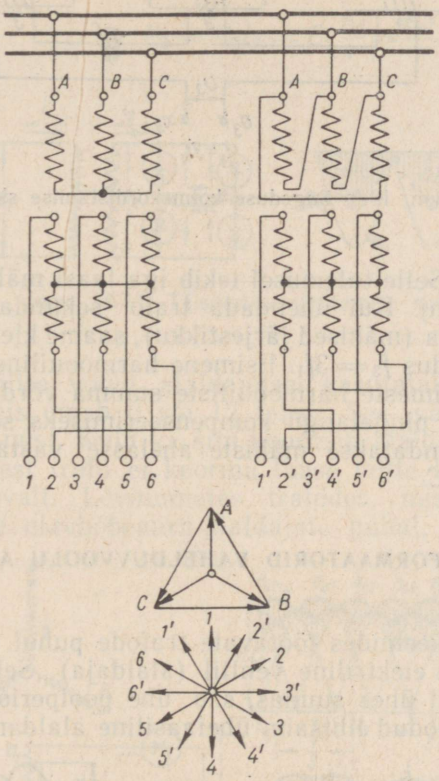
Joon. 18-7. Kolmefaasilise pingete süsteemi muundamine kahefaasiliseks kahe ühefaasilise trafo abil

Näiteks kolmefaasilist süsteemi saab muuta kahefaasiliseks kahe ühefaasilise trafo abil (joon. 18-7), I ja II trafo otsad *ABC* ühendatakse vastavate kolmefaasilise süsteemi klemmide külge. Primaarmähise *AO* klemm *O* ühendatakse mähise *BC* keskpunktiga. Seega pinge mähisel *AO* on $\frac{\sqrt{3}}{2}$ kordne mähise *BC* pingest. Sellel mähisel on $\frac{\sqrt{3}}{2} w_1$ keerdu.

Sümmeetrilise kolmefaasilise pingete

süsteemi puhul ning tühijooksul on sekundaarpoole pinged U_I ja U_{II} nihutatud faasis 90° võrra.

Alaldamisel kasutatakse kolmefaasilise süsteemi muundamist kuue- ja kaheteistfaasiliseks. Näiteks on toodud joonisel 18-8 trafo skeem, kus üks mähistest on ühendatud kolmefaasilisse, teine — kuuefaasilisse tähte. Võib ühendada mähised ka kolmnurka või siksakki.

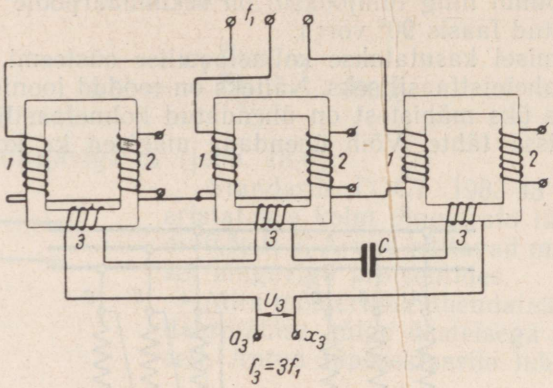


Joon. 18-8. Kolmefaasilise süsteemi muundamine kuuefaasiliseks

18-4. TRANSFORMAATORID SAGEDUSE MUUNDAMISEKS

Trafosid võib kasutada ka sageduse muundamiseks. Praktiliselt on leidnud kasutamist sageduse kahekordistamine ja kolmekordistamine. Näitena olgu toodud skeem joonisel 18-9 sageduse kolmekordistamiseks.

Nagu eespool selgus, tekib kolme ühefaasilise trafo primaarmähise ühendamisel tähte iga faasi magnetvoos tugev kolmas



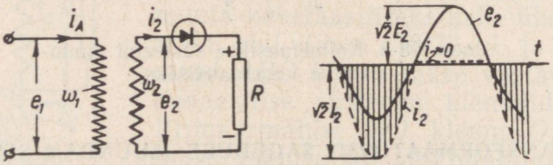
Joon. 18-9. Sageduse kolmekordistamise skeem

harmooniline. Selle tulemusel tekib iga faasi mähises kolmekordse sagedusega emj. Kui ühendada trafo sekundaarmähised lahtisesse kolmnurka (mähised järjestikku), saame klemmidel a_3x_3 pinge U_3, mille sagedus $f_3 = 3f_1$. Esimene harmooniline siin ei teki, sest kolme faasi esimeste harmooniliste summa võrdub nulliga.

Induktiivse pingelangu kompenseerimiseks sekundaarmähistes koormusel ühendatakse mähiste ahelasse vastava mahtuvusega kondensaator C.

18-5. TRANSFORMAATORID VAHELDUVVOOLU ALALDAMISSKEEMIDES

Alaldamisskeemides töötavate trafode puhul on sekundaarahelasse lülitatud elektriline ventiil (alaldaja). Selline ventiil laseb voolu läbi vaid ühes suunas, s. o. ühe poolperioodi kestel. Joonisel 18-10 on toodud lihtsaim ühefaasiline alaldamise skeem.



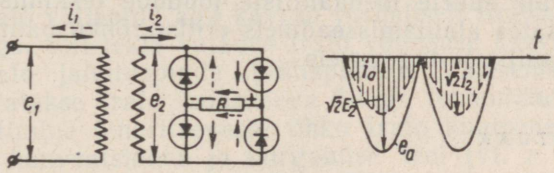
Joon. 18-10. Poolperioodalaldamise skeem

Sekundaarahela vool i_2 on pulseeriva iseloomuga: ühe pooleperioodi vältel esineb siinuseline vool, teise poolperioodi vältel voolu ei ole (joon. 18-10). Sekundaarmähises esi-

neva ühesuunalise pulseeriva voolu keskväärtus i_k ei ole null, mis põhjustab trafo südamiku ühesuunalist eelmagneetimist. Viimase asjaolu tõttu kasutatakse trafot ebanormaalselt ja mittetäielikult.

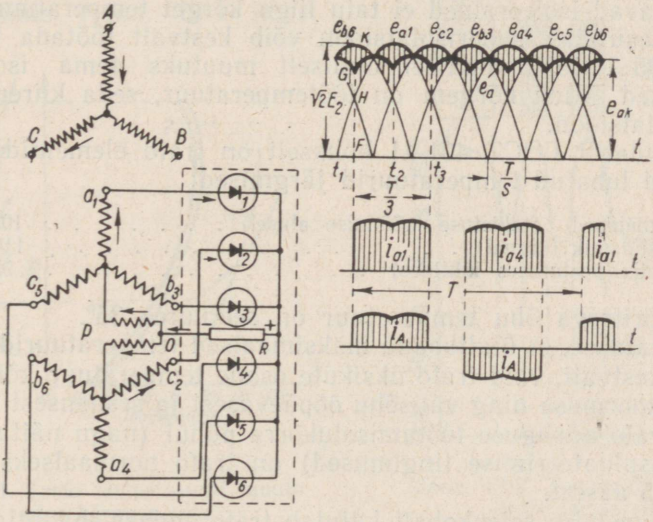
Tunduvalt paremad on trafo töötamistingimused täisperioodalaldamise skeemides, nagu näiteks sildlülituse kasutamisel (joon. 18-11). Niisugusel juhul on sekundaarmähises normaalne vahelduvvool ning eelmagneetimist ei esine. Trafo arvutuslik võimsus

$$P_2 = E_2 I_2 = E_2 \frac{E_2}{r} = \frac{E_2^2}{r}.$$



Joon. 18-11. Täisperioodalaldamise skeem

Kolmefaasilise voolu alaldamisel kasutatakse trafosid, mille sekundaarmähis omab 6 või 12 faasi. See vähendab alaldatud voolu pulseerimist. Kuid ka siin koormab alaldaja trafot ebasümmeetriliselt, sest trafo ei koorma faase mitte korraga, vaid üksteisele järgnevalt. Levinumates trafodes, mis leiavad kasutamist võimsate elavhõbeauru-alaldajate puhul, on primaarmähis



Joon. 18-12. Kolmefaasilise alaldaja skeem

ühendatud tähte, sekundaarmähis aga kaksiktähte (joon. 18-8). Alaldamise skeemi on sel puhul ühendatud paispool *P*, mille ülesandeks on pikendada üksikute ventiilide poolt alaldatud voolu kestust, mis parandab trafo töötamise tingimusi (joon. 18-12).

Alaldamisskeemis töötavale trafole on raskeimaks režiimiks tagasisüütamise olukord. Selline olukord tekib siis, kui alaldaja üks anoodidest temal tekkiva katoodpleki mõjul kaotab ventiili toime, mille tulemusel selle ja teiste anoodide vahel tekib lühis. Selle faasi mähises, milles töötab nimetatud anood, tekib normaalsega võrreldes mitmekordne vool. See rikub trafo magneetimisergutuste tasakaalu ning põhjustab trafo üksikutele mähisosadele mõjuvate suurte mehaaniliste jõudude tekkimist. Seepärast tuleb võimsates alaldamisseadmeis erilist rõhku panna trafo mähiste mehaanilisele tugevusele.

XIX PEATÜKK

TRANSFORMAATORITE SOOJENEMINE JA JAHUTAMINE

19-1. TRANSFORMAATORI SOOJENEMINE

Elektrienergia muundamisel tekivad trafos teatavasti kaod vases ja rauas. Nimetatud kaod muutuvad soojuseks, mis eraldub trafo mähistes, südamikes ja muudes osades. Eralduva soojuse mõjul trafo kuumeneb ja tema üksikute osade temperatuur võib seejuures tunduvalt ületada ümbritseva keskkonna temperatuuri.

Soojenemise tõttu on trafost saadav võimsus piiratud. Trafos kasutatavad isoleerained ei talu liiga kõrget temperatuuri. Tavaliselt kasutatav paberisolatsioon võib kestvalt töötada temperatuuril 95 ... 105°, ilma et oluliselt muutuks tema isoleerivad omadused. Mida kõrgem on töötemperatuur, seda kiiremini rikneb isolatsioon.

Standardi ГОСТ 401-41 kohaselt on trafo elementide maksimaalsed lubatud temperatuurid järgmised:

mähised (takistuse mõõtmise alusel)	105°
südamik (pinnal)	110°
õli (pealmistes kihtides)	95°

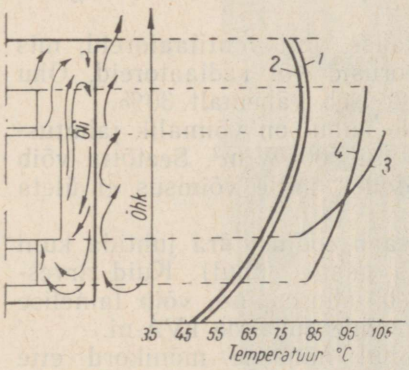
Ümbritseva õhu temperatuur on seejuures 35°.

Oletatakse, et ülaltoodud maksimaalsed temperatuurid ei esine trafos kestvalt, vaid trafo üksikute osade temperatuur kõigub sõltuvalt koormuse ning välisõhu ööpäevasest ja sesoonsest kõikumisest. Trafo niisuguse töötamisolukorra puhul (nagu näitavad trafode ekspluateerimise tingimused) on trafo normaalseks elueaks 10 ... 15 aastat.

Soojenemise seisukohalt kujutab trafo endast ebaühtlast keha. Südamiku teraslehed, millel on suur soojusjuhtivus, kuid väike

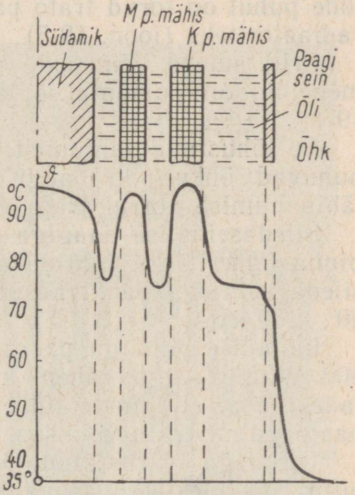
soojusmahtuvus, vahelduvad isolatsioonikihtidega (paber, lakk), mille soojusjuhtivus on halb. Samuti on lugu ka mähisega. Juhtme vask on hea soojusjuht, juhtme isolatsioon aga halb.

Trafo töötamisel kandub südamiku teraslehtedes ja mähise vaskjuhtmes tekkiv soojus soojusjuhtivuse teel sisemiselt soojenenud osadelt välispindade poole ning lahkub sealt väliskeskkonda. Trafo võimsuse kasvades suureneb trafo keha ruumala, sest mida suurem on trafo võimsus, seda suurem on trafo ruumala, sest seda rohkem on vaja aktiivseid materjale (vaske ja terast). Võimsuse suurenemisel kasvavad ka kaod trafos. Võib arvestada, et trafo kaod on võrdelised tema lineaarsete mõõtmete kuubiga. Trafo välispind aga kasvab võrdeliselt lineaarsete mõõtmete ruuduga. Siit tekib vajadus trafo võimsuse kasvamisel suurendada trafo jahutuspinda (välispinda). Väiksema võimsuse korral jahutatakse trafo ümbritseva õhuga loomulikul teel. Soojuse ärajuhtimine ümbritsevasse õhku trafo kuumenenud pindadelt toimub konventsiooni ja kiirgamise teel (vt. p. 7-3). Suurema võimsuse korral kasutatakse õlijahutust, mispuhul kogu trafo asetatakse suletud teraspaaki, mis on ääreni täidetud spetsiaalse trafoõliga. Õlitrafodes puutuvad kuumenenud trafo pinnad kokku õliga. Soojenedes viimane tõuseb üles ning annab oma soojuse paagi seintele ja kaanele. Jahtudes õli vajub mööda paagi seina allapoole. Soojuse ülekandmine toimub siin konvektsiooni teel. Mähise, südamiku ja õli vahel tekib teatud temperatuuride vahe. Seejuures õli ja trafo osade temperatuur muutub trafo kõrguse kui ka laiuse sihis (joon. 19-1 ja 19-2).



Joon. 19-1. Trafo temperatuuri muutumine kõrguse sihis:

1 — õli temperatuur; *2* — paagi seinte temperatuur; *3* — mähise temperatuur; *4* — südamiku temperatuur



Joon. 19-2. Temperatuuri jaotus trafo laiuse sihis

Kuna tegelik soojuse levimine trafos on keerukas protsess, siis tehakse selle nähtuse selgitamisel terve rida lihtsustusi. Oletatakse, et südamik ja mähised on ühtlased kehad, s. t. sama suurte välismõõtmete ja eralduva soojuse korral on neil samasugune soojusmahtuvus. Peale selle oletatakse, et igal trafo osal (südamik, mähis, õli, paak) on ühesuurune keskmine temperatuur. Neil oletustel on kasutatavad soojenemise ja jahtumise võrrandid, mis olid toodud VII peatükis.

Jõutrafodes on trafo osade keskmised temperatuuride vahed järgmised:

Mähise ja õli vahel	20 . . . 25°
Südamiku ja õli vahel	20 . . . 30°
Õli ja õhu vahel	40 . . . 45°
Temperatuuri lang paagi seintes	2 . . . 3°

19-2. TRANSFORMAATORI JAHUTAMINE

Väikese võimsusega õhk- ja õlijahutusega trafod ei vaja spetsiaalseid jahutusseadmeid. Nad jahtuvad, andes soojust ära kuumade mähiste, südamiku või paagi pindade kokkupuutumise tõttu ümbritseva õhu või õliga.

Suurema võimsusega trafode südamikes ja mähistes on jahutuskanalid (vt. eespool). Jahutuspinna suurendamise otstarbel tehakse niisuguste trafode paagid lainelistena (joon. 19-3) või varustatakse torudega (joon. 19-4). Väga suure võimsusega trafode puhul on torud trafo paagi pinnal ühendatud gruppidesse — radiaatoriteks (joon. 19-5).

Eriti suurte võimsuste puhul kasutatakse vesijahutust. Kuumenenud õli pumbatakse läbi veega jahutatavate torude (joon. 19-6).

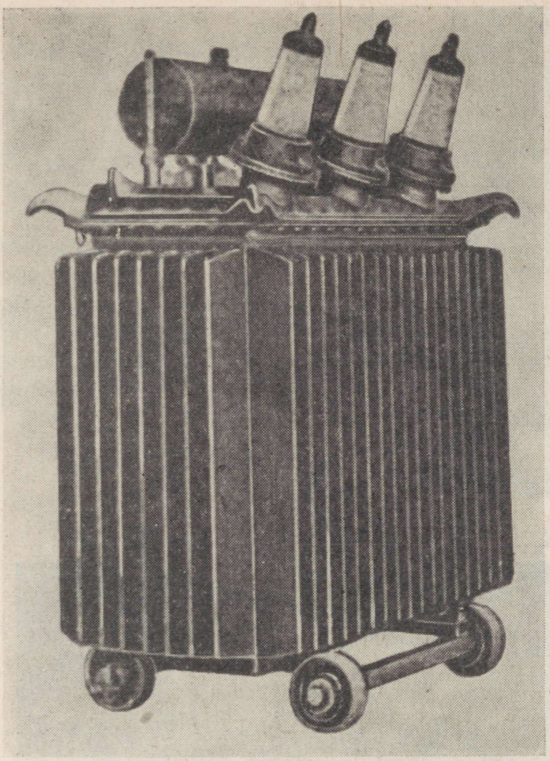
Et tõhustada jahtumist, kasutatakse tihti ventilaatoreid, mis puhuvad õhku piki paagi seina, torusid või radiaatoreid. Õhu läbipuhumise korral trafo võimsus tõuseb vähemalt 30%.

Siledaseinalise paagiga õlitrafode puhul on võimalik jahutuspinna ühikult ära juhtida soojust kuni 500 W/m^2. Seetõttu võib sileda seintega paaki kasutada trafodel, mille võimsus ei ületa 20 . . . 30 kVA.

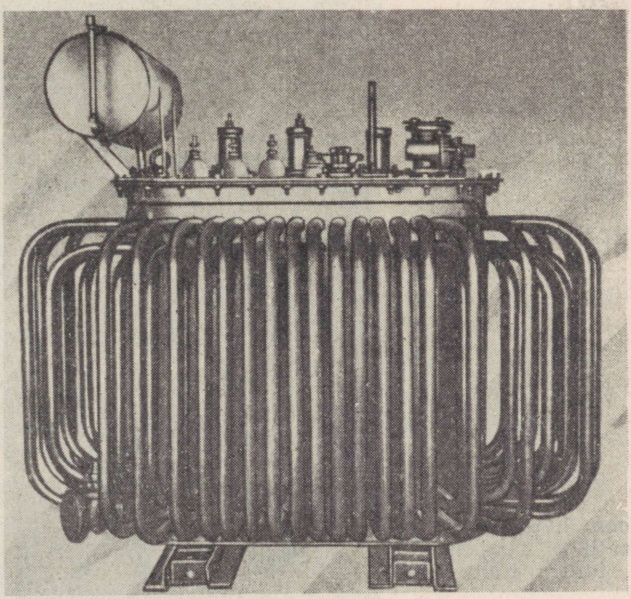
Lainelise pinnaga paagi puhul saab soojust ära juhtida kuni 400 W/m^2 (seega vähem kui sileda paagi puhul). Kuid arvestades seda, et lainete tõttu suureneb jahutuspind, võib lainelise paagi puhul trafo võimsus ulatuda mõne tuhande kVA-ni.

Torudega varustatud paagi puhul nähakse mõnikord ette mitu rida ülestikku asuvaid torusid. Seetõttu jahutuspind suureneb veelgi. Ärajuhitav soojushulk on torudega varustatud paagi puhul 400 . . . 450 W/m^2.

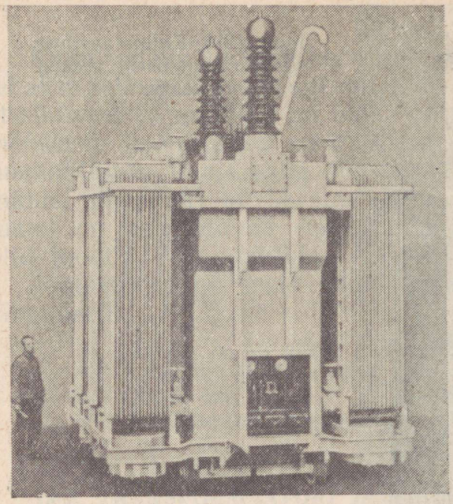
Torudega varustatud paagiga trafosid ehitatakse võimsusele kuni 15 000 . . . 20 000 kVA.



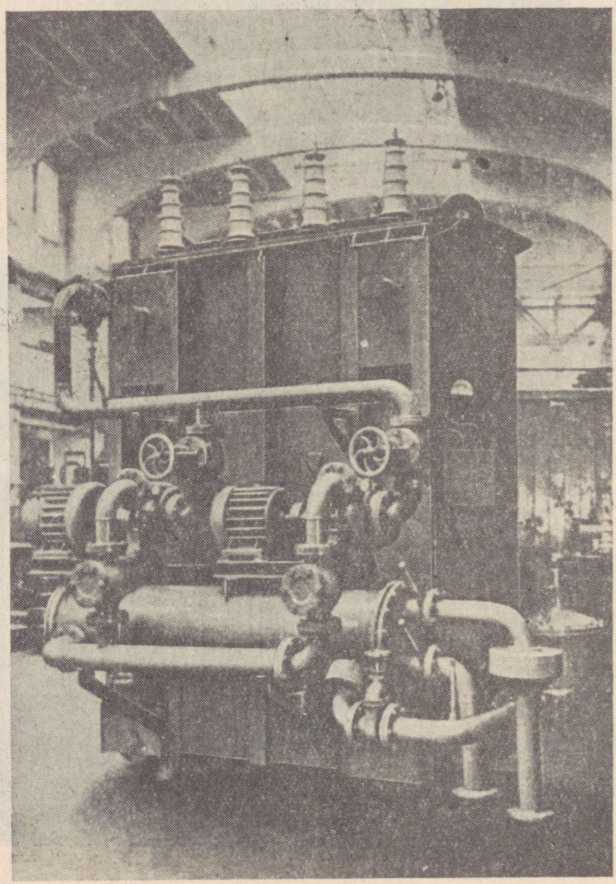
Joon. 19-3. Kolmefaasiline õlitrafo lainelisest plekist paagis



Joon. 19-4. Kolmefaasiline trafo torudega varustatud paagis



Joon. 19-5. Ühefaasiline õlitrafo radiaatoritega varustatud paagis

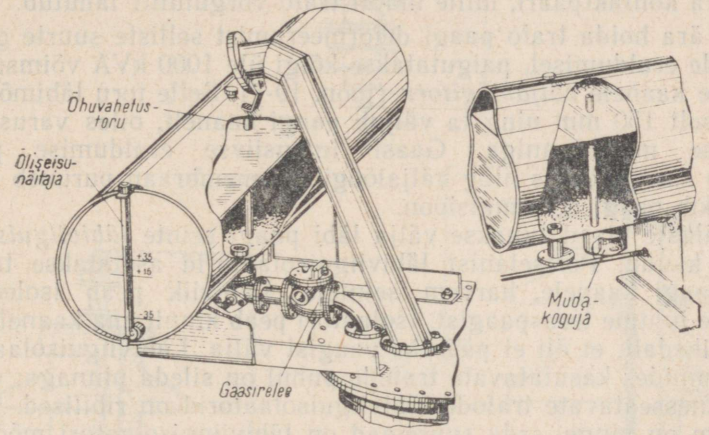


Joon. 19-6. Kolmefaasiline vesijahutusega trafo

Veel suuremate võimsuste puhul kasutatakse ventilaatoreid ning vesijahutust.

19-3. TRANSFORMAATORITE ARMATUUR

Temperatuuri muutumise tõttu muutub (paisumise tõttu) õli tase paagis. Kui trafo võimsus ei ületa 75 kVA ning pinge 6,3 kV, siis lubatakse õlil paisuda paagis. Suurema võimsuse ja kõrgema pinge puhul varustatakse trafo *õli paisumisnõuga* (konservaator). See on silindriline terasplekist anum, mis asetatakse horisontaalsesse asendisse trafo kaane kohale ning ühendatakse toru abil paagiga (joon. 19-7).



Joon. 19-7. Õli paisumisnõu ning väljalöögitoru

Õli paisumisnõus toimubki õli paisumine, kusjuures selle nõu maht on tavaliselt 10% paagi mahust.

Õli paisumisnõu varustatakse õliseisunäitajaga (klaastoruga) ning torukesega, mille kaudu toimub kokkupuude õhuga. Nii vähendatakse õhuga kokkupuutuva õli pinda ning piiratakse sellega õli niiskumist, oksüdeerumist ja mustumist.

Trafo töötamisel peab olema võimalus kontrollida trafo õli temperatuuri. Selleks varustatakse trafod võimsusega kuni 1000 kVA elavhõbe-klaastermomeetriga, mis asub trafo kaanel olevas eripesas. Suurema võimsusega (1000 . . . 5000 kVA) trafo puhul kasutatakse klaastermomeetri asemel kaugelt jälgitavat metalltermomeetrit (ka takistustermomeetrit).

Trafo töötamisel tekivad vahel kohalikud rikked, mille tõttu kuumenevad trafo üksikud osad (halb kontakt, ühendus südamiku

teraslehtede vahel). See põhjustab kuumenemise kohal asuva isolatsiooni ja trafo õli lagunemise, millega kaasub gaasi eraldumine.

Selliste vigastuste õigeaegseks avastamiseks kasutatakse *gaasireleed*. Kõigil trafodel võimsusega üle 560 kVA asetatakse see paagi kaane ja õli paisumisnõud ühendava toru vahele. Gaasimullid, mis eralduvad vigastuse kohal, tõusevad paagi ülemisse ossa ning sealt õli paisumisnõusse, kus nad toru kaudu satuvad ühtlasi ka gaasireleesse. Gaasirelees alaneb temas oleva õli pind ning vastav ujuk kaldub kõrvale, ühendades vastava signaalkontakti. Viimase kaudu rakendub signaalseade (näiteks lamp). Kui aga trafos tekib tunduv vigastus (ühe või mitme mähise keeru lühis jne.), millega kaasub intensiivne gaasi eraldumine, siis suure gaasihulga mõjul gaasirelees kaldub teine ujuk, mis sulgeb vastava kontaktpaari, mille mõjul trafo võrgulüliti lahutub.

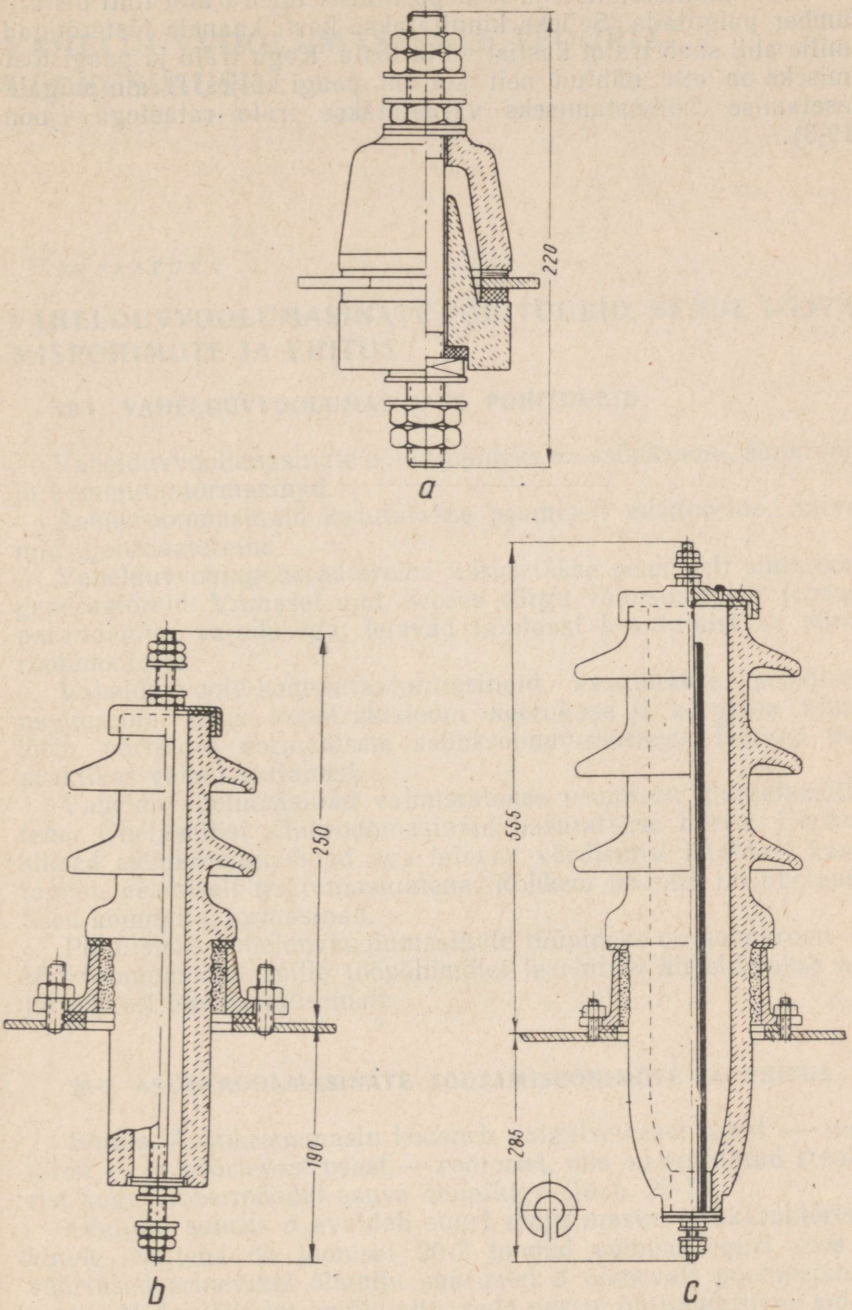
Et ära hoida trafo paagi deformeerumist selliste suurte gaasihulkade eraldumisel, paigutatakse kõigi üle 1000 kVA võimsusega trafode kaanele *väljalöögitoru* (joon. 19-7). Selle toru läbimõõt on tavaliselt 150 mm ning ta väljub paagi kaanelt, olles varustatud õhukese membraaniga. Gaasi intensiivse eraldumise puhul tõuseb surve paagis ning väljalöögitoru membraan puruneb enne, kui tekib paagi deformatsioon.

Mähiste otsad tuuakse välja läbi paagi seinte *läbiviiguisolaatorite* kaudu. Portselanist läbiviiguisolaatorid asetatakse tavaliselt paagi kaanele, harvem seintele. Läbiviik peab isoleerima mähise juhtme teraspaagist. Isolaatori peab kinnitama kaanel (seinal) tihedalt, et õli ei pääseks paagist välja. Läbiviiguisolaatorid siseruumides kasutatavate trafode puhul on sileda pinnaga; vabas õhus ülesseatavate trafode läbiviiguisolaatorid on ribilised. Mida kõrgem on pinge, seda suuremad on läbiviiguisolaatori mõõtmed ning seda keerukam tema konstruktsioon (joon. 19-8).

Ekspluatatsioonis puutub trafoõli kokku õhuga, ühineb õhu hapnikuga, niiskub ning mustub. Seetõttu halveneb trafoõli elektriline läbilöögitugevus ning õli muutub aja jooksul kõlbmatuks. Seepärast peab ekspluateerimisel kontrollima õli temperatuuri, õli koostist ning perioodiliselt õli puhastama, kuivatama ja regenereerima. Kõigi nende operatsioonide teostamiseks on vaja paagile asetada vastav armatuur. Temperatuuri kontrollimise armatuurist oli juba juttu eespool.

Õliproovide võtmiseks asub paagi alumises osas eriline kork. Õli sissekallamine ja väljavalamine toimub kahe kraani (ventiili) abil, millest üks asub kaanel ja teine paagi alumise osa seinal.

Kuni 100-kVA trafodel ei ole kraane. Need on asendatud korkidega. Kõigi õlitrafode põhjas asub kork, mille kaudu lastakse paagist välja põhja kogunenud mustus, niiskus ja õlijääk, mis sinna jäi õli väljavalamise järel alumisest kraanist.



Joon. 19-8. Trafo läbiviiguisolaatorid:
a — pingele 230 . . . 525 V; *b* — pingele 6 . . . 10 kV, välistüüpi; *c* — pingele 35 kV, välistüüpi

Trafo monteerimisel ja transportimisel tuleb trafot tihti tõsta ja ümber paigutada. Selleks kinnitatakse kasti kaanele tõsterõngad, mille abil saab trafot kastist välja tõsta. Kogu trafo ja paagi tõstmiseks on ette nähtud neli konksu paagi küljes. Trafo paigaleasetamise hõlbustamiseks varustatakse trafo ratastega (joon. 19-3).

VAHELDUVVOOLUMASINATE TEOORIA ÜLDKÜSIMUSI

XX PEATÜKK

VAHELDUVVOOLUMASINATE PÕHITÜÜBID, NENDE TÖÖTAMISPÕHIMÕTE JA EHITUS

20-1. VAHELDUVVOOLUMASINATE PÕHITÜÜBID

Vahelduvvoolumasinate põhitüüpideks on asünkroon-, sünkroon- ja kommutaatormasinad.

Asünkroonmasinaid kasutatakse peamiselt mootoreina, harvemini generaatoreina.

Vahelduvvoolugeneraatoreina kasutatakse peamiselt sünkroongeneraatoreid. Viimasel ajal, seoses võrgu võimsusteguri ($\cos \varphi$) parandamise vajadusega, leiavad laialdast kasutamist ka sünkroonmootorid.

Vahelduvvoolu-kommutaatormasinaid kasutatakse peamiselt mootoreina. Oma konstruktsiooni keerukuse ja kõrgema hinna tõttu, võrreldes normaalsete asünkroonmasinatega, leiavad nad praktikas vähe kasutamist.

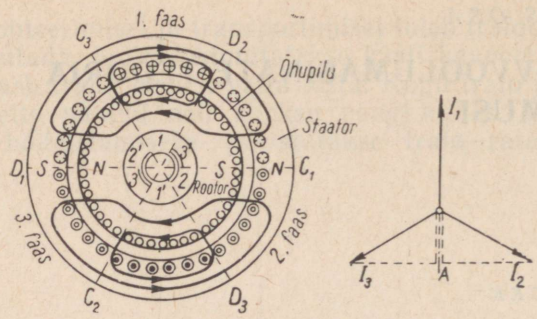
Vahelduvvoolumasinad valmistatakse peamiselt kolmefaasilistena. Ühefaasilisi sünkroonmasinaid kasutatakse harva. Ühefaasilised asünkroonmasinad aga leiavad võrdlemisi laialdast kasutamist, peamiselt mikromasinatena. Rohkem levinud on ühefaasilised kommutaatormasinad.

Põhilisteks vahelduvvoolumasinate tüüpideks on asünkroon- ja sünkroonmasinad, mille tööpõhimõtet ja ehitust kirjeldatakse alljärgnevalt üksikasjalisemalt.

20-2. ASÜNKROONMASINATE TÖÖTAMISPÕHIMÕTE JA EHITUS

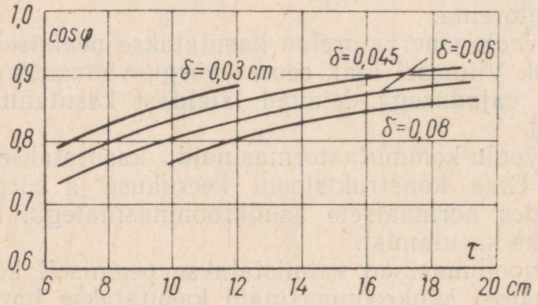
Ehitus. Asünkroonmasin koosneb paigalseisvast osast — staatorist — ja pöörlevast osast — rootorist, mis on eraldatud staatorist kogu ümbermõõdul asuva õhupiluga (joon. 20-1).

Õhupilu suurus δ avaldab suurt mõju masina töökarakteristikutele. Näitena on joonisel 20-2 toodud võimsusteguri ($\cos \varphi$) väärtused erinevatel õhupilu suurustel δ olenevalt poolusejaotusest τ. Mida väiksem on õhupilu, seda parem on induktiivne sides-



Joon. 20-1. Kolmefaasilise asünkroonmasina skemaatiline ehitus

tus staatori ja rootori vahel. Minimaalse lubatava õhupilu suurus määratakse tavaliselt võlli (rootori) mehaanilise tugevuse tingimustega ja osade töötlemistäpsusega. Tabelis 20-1 on toodud δ



Joon. 20-2. Võimsusteguri ($\cos\varphi$) väärtused olenevalt poolusejaotusest τ erinevatel δ väärtustel poollahtiste staatoriuuretega asünkroonmasinatele

väärtused normaalmasinate kohta olenevalt masina võimsusest (masina pöörlemiskiirusel $n = 1000$ p/min).

Tabel 20-1

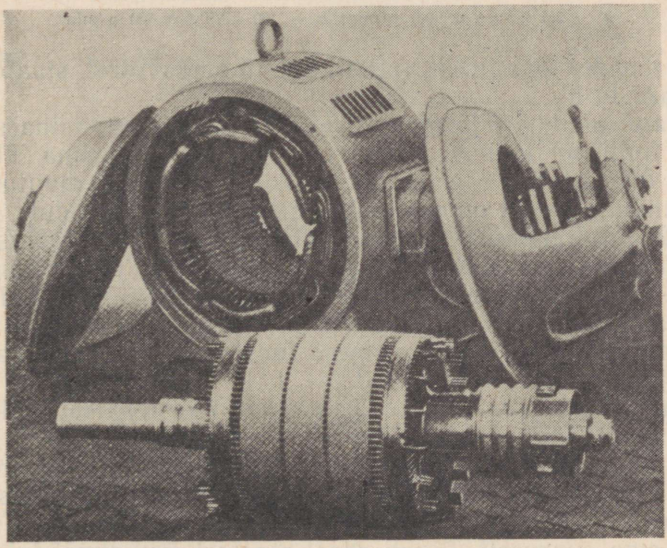
Õhupilu väärtused

P kW	δ mm
kuni 10	0,35 ... 0,50
10 ... 100	0,50 ... 0,80
100 ... 1500	0,80 ... 1,50

Staator ja rootor on koostatud rauaskaovõimsuse vähendamiseks üksikutest elektrotehnilisest terasest stantsitud ja üksteisest lakkisolatsiooniga eraldatud lehtedest (tavaliselt paksusega 0,5 mm). Nendesse lehtedesse on õhupilu-poolsele küljele stantsitud uurded, kuhu on paigutatud mähis.

Olenevalt rootori mähise ehitusest jaotatakse asünkroonmasinad faasirootoriga ja lühisrootoriga asünkroonmasinateks. Viimased omakorda jagunevad normaalseteks lühisrootoriga asünkroonmasinateks ja sügav- ning kaksikuuretega (Dolivo-Dobrovolski) asünkroonmasinateks.

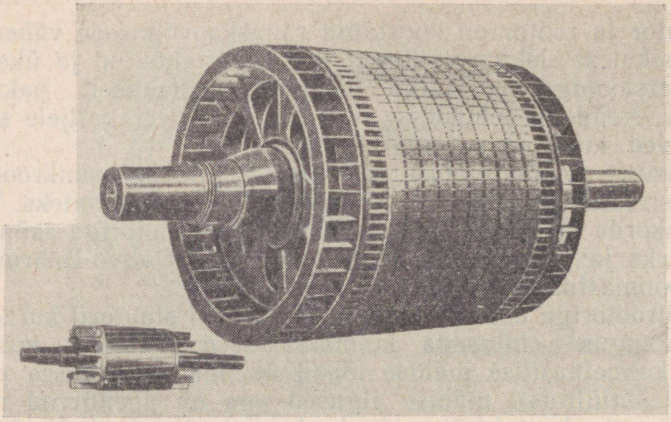
Faasirootoriga asünkroonmasinatel on nii staatoril kui ka rootoril ühesuguse ehitusega kolmefaasilised mähised, kusjuures rootori kolmefaasilise mähise lõpud ühendatakse ühises punktis kokku (tähtlülitus), mähise algused aga on ühendatud masina võllil asuvate kontaktrõngaste ja harjade kaudu kolmefaasilise käivitusreostaadiga (joon. 20-3).



Joon. 20-3. Kontaktrõngastega kolmefaasiline asünkroonmootor lahtivõetult; võimsus 40 kW, pöörlemiskiirus 725 p/min

Lühisrootoriga asünkroonmasin erineb eelmisest ainult rootori mähise ehituse poolest. See mähis koosneb siin uurdeisse paigutatud vask- või alumiiniumvardaist, mis rootori otstes on ühendatud ühiste rõngastega. Sageli on viimaste külge kinnitatud ka ventilaatori aset täitvad tiivikud (joon. 20-4).

Tänapäeval ehitatavate asünkroonmasinate võimsus kõigub



a *b*

Joon. 20-4. Asünkroonmootorite lühisrootorid:
a — 2,8 kW, $n = 1440$ p/min; *b* — 400 kW, $n = 590$ p/min

suurtes piirides — mõnest vatist kuni 15 megavatini, staatori pingetel kuni 10 kV.

Töötamispõhimõte ja mootorirežiim. Asünkroonmasina staatori mähise toitmisel kolmefaasilise vooluga tekib masina õhupilus pöörlev magnetväli, s. o. magnetväli, mis ajaliselt muutumatuks jäädes muudab vaid oma asendit staatori ümbermõõdul.

Õeldu selgitamiseks vaatleme järgmist juhtumit. Joonisel 20-1 on skemaatiliselt näidatud kahepooluselise asünkroonmasina voolude ja magnetvälja jaotus hetkel, mil vool esimeses faasis läbib maksimaalse väärtuse. Teises ja kolmandas faasis on vool vastassuunaline ja võrdne poole esimese faasi voolu väärtusega (vektor *OA* joon. 20-1).

Nagu nähtub jooniselt, ühtib magnetvälja telg sel hetkel esimese faasi mähise teljega C_1D_1.

Kui me vaataksime magnetvälja telje asetust hetkel, mil vool saavutab maksimaalse väärtuse teises ja kolmandas faasis, siis näeksime, et magnetväli, jäädes mähise sümmeetria tõttu muutumatuks oma suuruselt, liigub edasi staatori ümbermõõdul, võttes vastavalt antud hetkedele asendid C_2D_2 ja C_3D_3. Seega teeb magnetväli staatori ümbermõõdul ühe vahelduvvoolu perioodi jooksul ühe pöörde. Niisugust magnetvälja nimetatakse pöördmagnetväljaks.

Kui asünkroonmasina staatori mähise poolt tekitatakse staatori ümbermõõdul magnetväli, mille pooluspaaride arv p on suurem kui üks, siis ühe vahelduvvoolu perioodi jooksul liigub magnetväli staatori ümbermõõdul vahemaa, mis vastab kahele kõrvuti seisvale ja erinimelisele poolusele, s. o. $1/p$ osa kogu staatori ümbermõõdust. Seega p pooluspaari korral sooritab magnetväli

staatori ümbermõõdul ühe täispöörde pf_1 vahelduvvoolu perioodi jooksul (kus f_1 — staatori mähist toitva vahelduvvoolu sagedus), s. o. p korda aeglasemalt kui ühe pooluspaari korral.

Magnetvälja pöörlemiskiirust n_1 pööret minutis (p/min) staatori ümbermõõdul nimetatakse vahelduvvoolumasina sünkroonkiiruseks. Magnetvälja pöörlemiskiirus n_1 p/min on määratud staatori mähise poolt loodud pooluspaaride arvuga p ja vahelduvvoolu sagedusega f_1 järgmiselt:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}. \qquad (20\text{-}1)$$

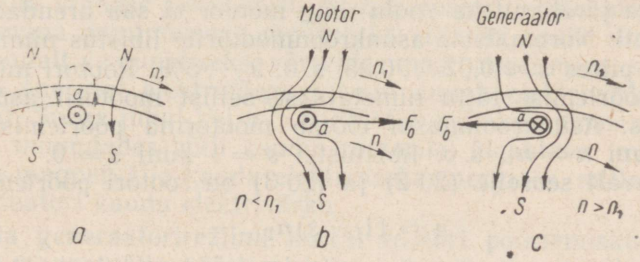
Tabelis 20-2 on toodud magnetvälja pöörlemiskiirused n_1 sagedusel 50 Hz olenevalt masina pooluspaaride arvust p.

Tabel 20-2

Magnetvälja pöörlemiskiirused n_1 sagedusel 50 Hz

p / n_1	1	2	3	4	5	6	8	10
p/sec	50	25	$16\frac{2}{3}$	12,5	10	$8\frac{1}{3}$	$6\frac{1}{4}$	5
p/min	3000	1500	1000	750	600	500	375	300

Staatori mähise poolt tekitatud pöördmagnetväli, liikudes rootori mähise suhtes, indutseerib viimases emj., mille suund on määratud parema käe juhisega. Joonisel 20-5, *a* toodud juhul staatorist



Joon. 20-5. Asünkroonmasina töötamispõhimõte mootori- ja generaatorirežiimis

rootorisse suunatud magnetväli, pööreldes kellaosutite liikumise suunas, indutseerib rootori mähise vardas *a* emj., mille suund on joonise tasapinnalt vaatleja suunas. Sama suunda omab ka voolu aktiivkomponent vardas. Rootori mähise voolu poolt tekitatud magnetväli ja staatori pöördmagnetväli koos annavad resulteeriva pöördmagnetvälja, nagu on näha joonisel 20-5, *b*. Rootori voolu

aktiivkomponent tekitab pöördmagnetvälja koosmõjul rootori vardale jõu, mille suund vasakult paremale on määratud vasaku käe juhisega. Antud jõud tekitab mootori võllil pöördmomendi pöördvälja pöörlemise suunas. Kui tekitatud moment ületab rootori võllile mõjuva takistusmomendi väärtuse, hakkab rootor pöörlema magnetvälja pöörlemise suunas.

Kolmefaasilise asünkroonmootori magnetvälja pöörlemise suund oleneb staatori mähist toitva vahelduvvoolu faasijärjestusest. Seega on asünkroonmasina pöörlemissuuna muutmiseks vaja muuta staatori mähisele toodud vahelduvvoolu faasijärjestust. Praktiliselt saavutatakse see staatori ükskõik millise kahe faasijuhtme omavahelisel ümberlülitamisel.

Rootori pöörlemisel kiirusega n on staatori mähise pöördvälja liikumise kiirus rootori mähise suhtes võrdne $n_1 - n$ rootori mähises indutseeritud emj. (voolu) sagedus

$$f_2 = (n_1 - n)p = \frac{n_1 - n}{n_1} pn_1 = sf_1, \tag{20-2}$$

kus

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{20-3}$$

kujutab endast rootori pöörlemisel suhtelist mahajäämise kiirust pöördmagnetväljast ja nimetatakse libistuseks. Seisva rootori korral ($n = 0$) libistus $s = 1$, rootori sünkroonkiirusel ($n = n_1$) aga $s = 0$.

Asünkroonmootor töötab alati mingi positiivse libistusega s, kuna juhul $s = 0$ ($n = n_1$) pöördmagnetväli, olles liikumata rootori mähise suhtes, ei indutseeri viimases mingit elektromotoorset jõudu ega järelikult ka voolu ning mootor ei saa arendada pöördemomenti. Normaalsete asünkroonmootorite libistus nimikoormusel asub piires $s \approx 0{,}02 \ldots 0{,}05$, s. o. $2 \ldots 5\%$. Rootori mittesünkroonse pöörlemise tõttu nimetatakse sellist mootorit asünkroonmootoriks. Asünkroonmasin töötab mootorina pöörlemiskiirustel $n = 0$ kuni $n = n_1$, s. o. libistustel $s = 1$ kuni $s = 0$.

Vastavalt seoseile (20-2) ja (20-3) on rootori pöörlemiskiirus

$$n = (1 - s)n_1 \tag{20-4}$$

ja rootori voolu sagedus

$$f_2 = sf_1. \tag{20-5}$$

Vool sagedusega f_2 rootori varrastes tekitab oma pöördmagnetvälja, mis pöörleb rootori suhtes kiirusega

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = s\frac{f_1}{p} = sn_1. \tag{20-6}$$

Tekitatud magnetväli mootori režiimis ($0 < s < 1$) pöörleb rootori suhtes rootori pöörlemise suunas.

Seisva staatori suhtes liigub rootori pöördmagnetväli kiirusega

$$n_{21} = n + n_2 = (1 - s)n_1 + sn_1 = n_1, \qquad (20\text{-}7)$$

s. o. rootori magnetväli pöörleb olenemata libistusest sünkroonselt staatori magnetväljaga, luues koos viimasega resulteeriva magnetvälja.

Eeltoodust selgub, et asünkroonmasin omab palju ühist oma tööpõhimõttelt trafoga. Vahe seisab ainult selles, et asünkroonmasina korral staatori ja rootori mähise elektromagnetiline sidestus toimub pöördmagnetvälja kaudu ning rootori mähis liigub staatori mähise suhtes.

Nagu trafoski muutub asünkroonmasina magnetvoog Φ püsiva klemmipinge U_1 korral koormusel vähe. Seega pöördvälja poolt staatori mähises indutseeritud emj. E_1 võrdub klemmipingega U_1 miinus pingelang staatori mähise aktiiv- ja puisteinduktiivtakistusel, mis iseenesest moodustab suhteliselt väikese osa.

Generaatorirežiim. Juhul kui paneme mingi ajami abil asünkroonmasina rootori pöörlema kiiremini staatori magnetvälja pöörlemiskiirusest ($n > n_1$), lõikuvad rootori juhtmed magnetväljaga mootorirežiimiga võrreldes vastupidises suunas. Seepärast muutub rootori juhtmes a indutseeritud emj. ja voolu suund, mis on joonisel 20-5, c näidatud juhul suunatud vaataja poolt joonise tasapinna taha. Pöördvälja ja rootori voolu aktiivkomponendi poolt tekitatud elektromagnetiline moment on antud juhul vasaku käe reegli põhjal suunalt vastupidine pöördvälja pöörlemise suunale (n_1), s. o. rootorit ringi ajava mootori momendile, püüdes nagu pidurdada viimase pöörlemist. Seoses rootori voolu aktiivkomponendi suuna muutumisega muutub ka staatori voolu aktiivkomponent suunalt vastupidiseks, võrreldes mootorirežiimiga, s.t. staator ei võta energiat elektrivõrgust, vaid annab elektrivõrku elektrienergiat. Seega juhul kui $n > n_1$, töötab asünkroonmasin generaatorina, muundades võlli kaudu rootorile üleantava mehaanilise energia magnetvälja kaudu elektriliseks energiaks, mille ta annab edasi staatori kaudu elektrivõrku.

Kuna generaatorirežiimi korral rootori pöörlemiskiirus n on suurem magnetvälja pöörlemiskiirusest n_1 ($n > n_1$), siis valemiga (20-3) määratud asünkroonmasina libistus muutub sel juhul negatiivseks. Seega sagedusega f_2 rootori vool tekitab rootori pöördmagnetvälja, mis rootori suhtes pöörleb valemi (20-6) põhjal kiirusega $n_2 = -sn_1$, s. o. pöörleb staatori magnetväljale vastassuunas. Kuid seisva staatori suhtes liigub rootori pöördväli kiirusega $n_{21} = n + n_2 = [1 - (-s)]n_1 - sn_1 = n_1$, s. o. sünkroonselt.

Teoreetiliselt võib generaatorirežiimis olla rootori pöörlemiskiirus kuitahes suur. Järelikult kui asünkroonmasin töötab generaa-

torina, siis tema pöörlemiskiirus asub vahemikus $n = n_1$ kuni $n = \infty$ ja libistus vastavalt $s = 0$ kuni $s = \frac{n_1 - \infty}{n_1} = -\infty$.

Magnetvälja tekitamiseks tarvitavad asünkroongeneraatorid elektrivõrgust reaktiivset voolu (25 ... 50% nimivoolust), mistõttu nad halvendavad tublisti võrgu võimsustegurit ($\cos \varphi$). Seetõttu pole asünkroongeneraatorid leidnud eriti laialdast kasutamist.

Elektromagnetilise piduri töörežiim. Kujutleme, et mingi rootorile rakendatud jõu tõttu viimane hakkab pöörlema vastu magnetvälja pöörlemise suunda. Sel korral asünkroonmasin saab energiat kahelt poolt — elektrilist energiat elektrivõrgust staatori kaudu ja mehaanilist energiat ajamilt võlli (rootori) kaudu. Kulutatud energia muundub masinas soojusenergiaks, mistõttu masin kuumeneb väga kiiresti. Niisugust töörežiimi nimetatakse elektromagnetiliseks pidurdamiseks ja algab kiirusel $n = 0$ ja võib teoreetiliselt kesta kuni $n = -\infty$, s. o. libistusil $s = 1$ kuni $s = \frac{n_1 - (-\infty)}{n_1} = +\infty$.

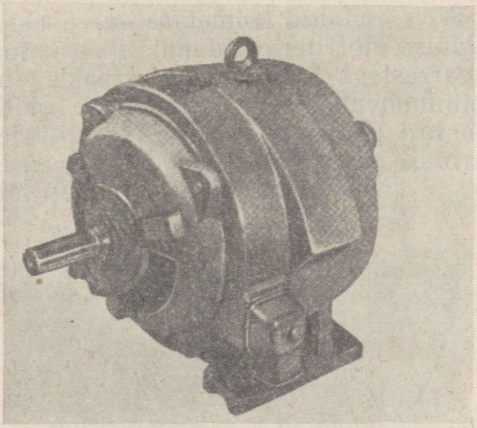
Asünkroonmootorit kasutatakse elektromagnetilise pidurina näiteks tõste-transpordiseadmeis raskuste allalaskmisel ning metallilõikepinkide peatamisel. Niisugune töörežiim tekib viimasel juhul järgmiselt. Kui lülitame asünkroonmootori lühiajaliselt võrgust välja, jätkab rootor mehaaniliste masside inertsi tõttu veel pöörlemist esialgses suunas. Lülitades omavahel ümber asünkroonmootori kaks staatori faasijuhet ja lülitades seejärel kiiresti asünkroonmootori elektrivõrku, tekib pöörlev magnetväli, mille suund on vastupidine rootori pöörlemissuunale. Seejuures tekib elektromagnetiline pidurdamine, kuna tekkiv elektromagnetiline moment on mehaanilisele inertsmomendile vastassuunaline. Pidurdamine kestab, kuni mootor jääb täiesti seisma, misjärel tuleb mootor elektrivõrgust kiiresti välja lülitada. Vastasel juhul võib asünkroonmootor (ja kogu ajam) hakata pöörlema endisele pöörlemissuunale vastassuunas (uue magnetvälja pöörlemise suunas).

20-3. ASÜNKROONMASINATE KONSTRUKTSIOON

Asünkroonmasinad leiavad rahvamajanduses kõige laialdasemat kasutamist. Kuni 100 kW võimsusega asünkroonmasinate poolt tarvitatakse ligi 50% kogu NSV Liidus toodetavast elektrienergiast ning nende aastane toodang moodustab võimsuse poolest mitu miljonit kilovatti. Niisuguse massilise tootmise juures tuleb asünkroonmasinate projekteerimisel osutada põhitähelepanu konstruktsiooni lihtsusele, detailide ja konstruktsiooni sõlmede unifitseerimisele ja normaliseerimisele ning tootmise tehnoloogia lihtsusele. Nendele nõuetele vastavad asünkroonmasinate seeriad, s. o. suureneva võimsusskaalaga masinate read, mis omavad ühe-

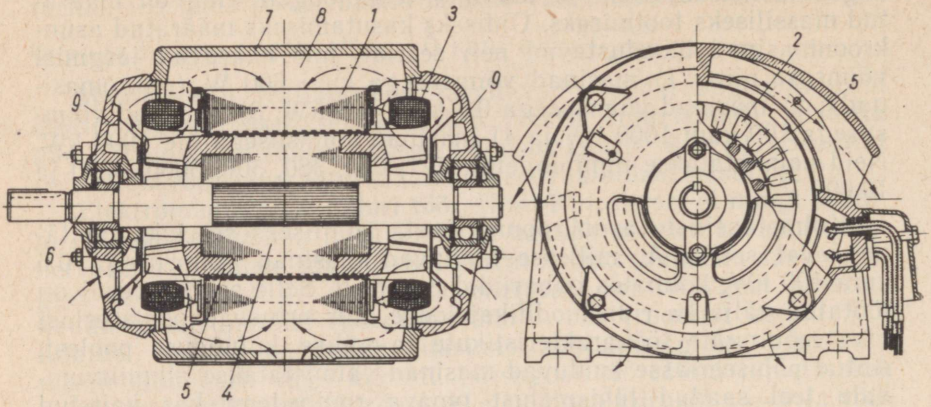
sugust konstruktsiooni ja tootmise tehnoloogiat ning on määratud massiliseks tootmiseks. Üldiseks kasutamiseks määratud asünkroonmasinad moodustavad neli seeriat, mis haaravad järgmisi võimsuse piire: 1) masinad võimsusega kuni 600 W (mikromasinad); 2) masinad võimsusega 0,6 kuni 100 kW; 3) masinad võimsusega 100 kuni 1000 kW ja 4) masinad võimsusega üle 1000 kW. Neid valmistatakse nimipingetele 127, 220, 380, 500, 3000, 6000 ja 10 000 V.

Kolmefaasiliste asünkroonmasinate põhiliseks seeriaks on tänapäeval seeria A, millesse kuuluvad masinad võimsusega 0,6 kuni 100 kW, hõlmates gabariidid 3 kuni 9. Selle seeria alusel on töötatud välja ka rida modifikatsioone, mis erinevad põhiseeriast oma mõningate töökarakteristikute ja välise kujunduse poolest. Antud põhiseeriasse kuuluvad masinad valmistatakse alumiiniumvalu teel saadud lühismähist omava rootoritega kas kaitstud või kinnise ehitusviisiga, kusjuures põhitüüpideks on A, АЛ (kaitstud ehitusviis, Л — alumiiniumkerega) ja АО, АОЛ (kinnise ehitusviisiga, välispinna sundjahutusega).



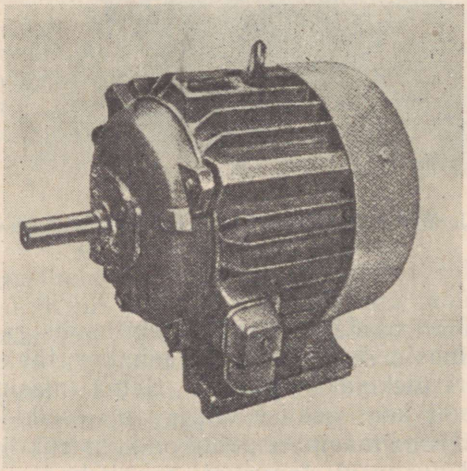
Joon. 20-6. Kaitstud ehitusviisiga viienda gabariidi asünkroonmasin A-51

Joonisel 20-6 on näidatud kaitstud ehitusviisiga viienda gabariidi asünkroonmasin A-51 (esimene number tähistab gabariiti, teine — staatori plekipaki pikkust). Sama masina pikilõige ja vaade ajami poolt koos osalise lõikega on toodud joonisel 20-7. Kaitstud ehitusviisiga masinate puhul on konstruktiivsete abinõude varal takistatud nurga all langevate veepiiskade sissetungimine ning pöörlevate ja voolujuhtivate osade juhuslik puudutamine. Niisugune asünkroonmasin koosneb elektrotehnilisest terasest valmis-



Joon. 20-7. Kaitstud ehitusviisiga asünkroonmasina A-51 pikilõige ja vaade

tatud staatorist *1* (joon. 20-7), mille õhupilu-poolsesse külge stantsitud uurdeisse *2* on asetatud kolmefaasiline ühekihiline mähis *3*. Võllil *6* asuva lühisrootori terassüdamik *4* on varustatud lühistatud alumiiniumvarrastega *5*. Staatori plekipakk *1* hoitakse paigal malm- või alumiiniumvalust kere *7* vastavate ribidega *8*. Rootor fikseeritakse staatori plekipaki suhtes laagrikilpidega *9*, mis detailide unifitseerimise mõttes on tehtud ühesugused. Joonisel 20-7 on punktiirjoone ja nooltega näidatud ka jahutusõhu teekond.

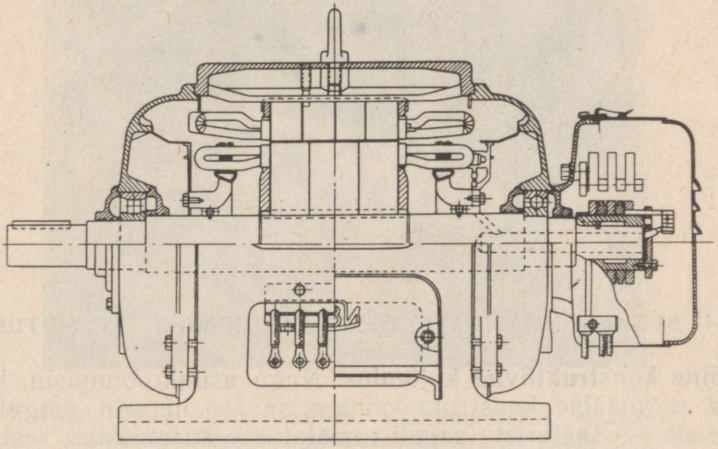


Joon. 20-8. Kinnise ehitusviisiga viienda gabariidi asünkroonmasin AO-51

Joonisel 20-8 on kujutatud kinnise ehitusviisiga viienda gabariidi asünkroonmasin AO-51, mis jahutamise intensiivistamiseks on varustatud välisribidega. Masina esiosas (ajami vastaspoolses osas) asub pealtpoolt plekk-kestaga kaitstud ventilaator.

Modifikatsioonidena võib mainida suurendatud libistusega masinaid (tüübid AC ja AOC), suurendatud algmomendiga masinaid (tüüp АОП), tekstiilitööstusele määratud masinaid (tüüp АОТ), kontaktrõngastega masinaid (tüüp АК), mitme kiirusega masinaid jt. Märgime veel siinkohal, et seeria A (0,6 ... 100 kW) asendas varem toodetud üheksat erinevat seeriat, kusjuures masinate tüüpmõõtmete arv vähenes peaaegu kümme korda.

Võimsuste piirkonnas 100 ... 1000 kW ehitatakse praegu mitu seeriat, mis haaravad gabariidid 11 ... 15. Põhiliseks ehitusviisiks on kaitstud ehitusviis kahe laagrikilbiga. Jahutusviisidena kasutatakse kas loomulikku endajahutust (analoogiliselt seeriale A) või siis sõltumatut jahutust, kus jahutusõhk juhitakse mõlema laagrikilbi juurde erilise torustiku kaudu ja väljub masinast keres asuvate jahutusavade kaudu. Põhilisteks seeriateks selles võimsusvahemikus on АМ6, ГАМ6, ДАМ6, ФАМСО, ДАМСО ja КАМО. Tähtede tähendus tüüpide tähistuses on järgmine: А — asünkroonmasin, М — mootor, Г — sügavuuretega, Д — kaksikuuretega, С — spetsiaalne, О — kaitstud ehitusviisiga.

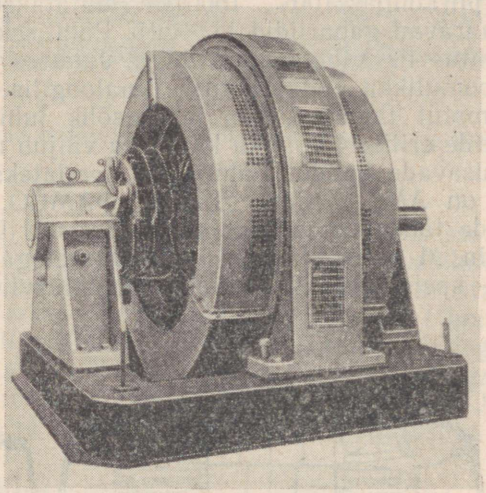


Joon. 20-9. Faasirootoriga asünkroonmasina АК-81 pikilõige

Joonisel 20-9 on toodud faasirootoriga asünkroonmasina АК-81 läbilõige.

Asünkroonmasinad võimsusega üle 1000 kW valmistatakse üksikute seeriatena, mis haaravad gabariidid 16, 17, 18, 19 ja 20. Niisuguste masinate staatori ja rootori südamikud koostatakse

üksikutest elektrotehnilisest plekist valmistatud segmentidest ja kere keevitatuna terasplekkidest. Väliskeskkonnast kaitsmise viisi järgi ehitatakse neid lahtistena ja loomuliku ventilatsiooniga või kinnistena ja sundõhutsirkulatsiooniga. Lahtise ehitusviisi korral pole väliste võõrkehade sissetungimine masinasse ja voolu juhtivatele ning pöörlevatele osadele juurdepääs praktiliselt takistatud. Konstruktiivselt koosnevad nad alusplaadile kinnitatud staatorist ja kahest liuglaagrialusest, millele toetub rootor. Joonisel 20-10 on toodud lahtise ehitusviisiga asünkroonmootori AT-19 vaade.



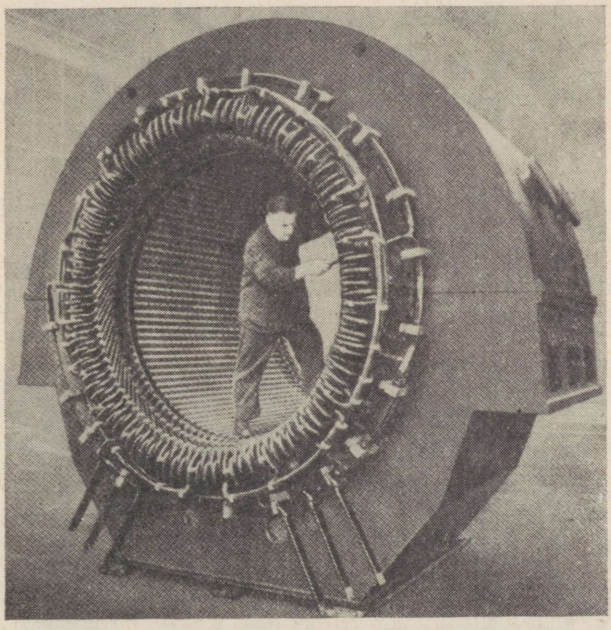
Joon. 20-10. Lahtise ehitusviisiga kolmefaasiline asünkroonmasin AT-19

20-4. SÜNKROONMASINATE TÖÖTAMISPÕHIMÕTE JA EHITUS

Üldine konstruktiivne kujundus. Nagu asünkroonmasin, koosneb ka normaalse konstruktsiooniga sünkroonmasin paigalseisvast osast — staatorist (sageli nimetatakse ka ankruks, sest siin toimub analoogiliselt alalisvoolu generaatorile elektrienergia tekitamine mehaanilise energia arvel, mootori puhul aga elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks) ja pöörlevast osast — rootorist (nimetatakse ka induktoriks), millel asub alalisvooluga toidetav ergutusmähis. Õhupilu laius on sünkroonmasinail märksa suurem kui asünkroonmasinail. Kuna siin magnetväli tekitatakse alalisvooluga eraldi vooluallikast, mitte aga reaktiivse vooluga vahelduvvoolu võrgust, siis õhupilu laius pole nii piiratud kui asünkroonmasina puhul. Lähtudes konstruktiivseist kaalutlu-

sist ning masina töökarakteristikute vajalikul tasemel hoidmisest valitakse õhupilu laius 5 ... 50 mm piires, olenevalt masina võimsusest (vt. tabel 20-3). Ergutusmähise toitmiseks vajalik alalisvool saadakse enamasti rootoriga otsesidurdatud väiksemast alalisvoolugeneraatorist, nn. ergutusmasinast (vt. joon. 20-17). Viimasel ajal kasutatakse võimsate hüdrogeneraatorite ergutusmähise toitmiseks ioonergutajaid.

Väikeste võimsuste puhul, vastandina varemkirjeldatud ehitusviisile, ehitatakse sünkroonmasinaid, kus ergutusmähis asub paigalseisval osal — staatoril ja vahelduvvoolumähis — rootoril, kust mähise otsad on välja toodud kontaktrõngaste ja harjade kaudu klemmiplaadile. Edaspidises käsitluses peame silmas normaalse konstruktsiooniga sünkroonmasinaid.



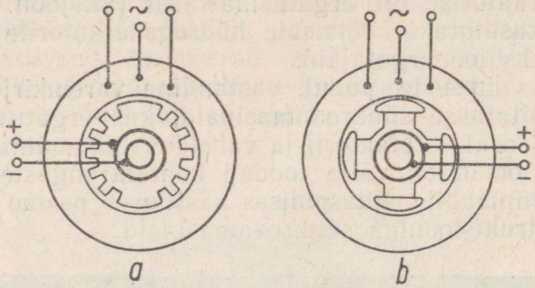
Joon. 20-11. Kolmefaasilise sünkroonmasina staator; võimsus 20 MVA, pöörlemiskiirus 1000 p/min

Sünkroonmasina staator (joon. 20-11) on ehituselt täiesti samasugune asünkroonmasina staatoriga, koosnedes elektrotehnilise terase lehtedest koostatud südamikust ja õhupilu-poolsesse külge stantsitud uuretesse paigutatud mähisest.

Konstruktsioonilt eristatakse kahte sünkroonmasinate tüüpi: a) nähtamatute poolustega (ümarrootoriga) masinad, milles poolused asuvad peidetud kujul (joon. 20-12, *a*); b) nähtavate poolus-

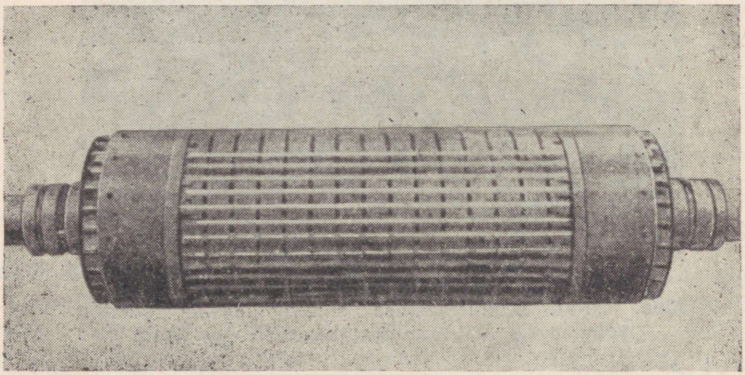
tega masinad, kus üksikud poolused on selgesti eristatavad (joon. 20-12, *b*).

Masina konstruktiivne tüüp oleneb pöörlemiskiirusest. Suurtel pöörlemiskiirustel ja väikese pooluspaaride arvu korral (näit.



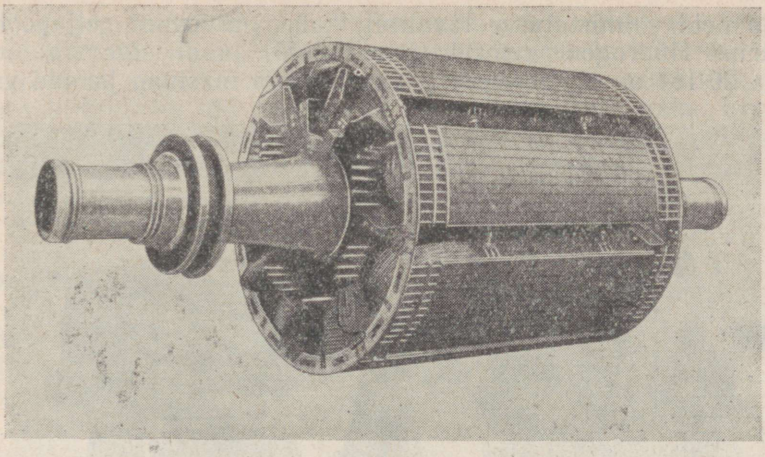
Joon. 20-12. Sünkroonmasina põhitüüpide ehituse skeemid:
a — nähtamatute poolustega masin; *b* — nähtavate poolustega masin

sagedusel $f = 50$ Hz, $p = 1$, $n = 50$ p/sec $= 3000$ p/min; $p = 2$, $n = 25$ p/sec $= 1500$ p/min) on rootori ringkiirus niivõrd suur (ulatudes kuni 170 m/sec), et rootori mehaanilise tugevuse ning ergutusmähise parema paigutuse ja kinnitamise seisukohalt on parem kasutada terasest valmistatud ümarrootorit (joon. 20-13).



Joon. 21-13. Kolmefaasilise turbogeneraatori rootor; võimsus 12 500 kVA, pöörlemiskiirus 3000 p/min

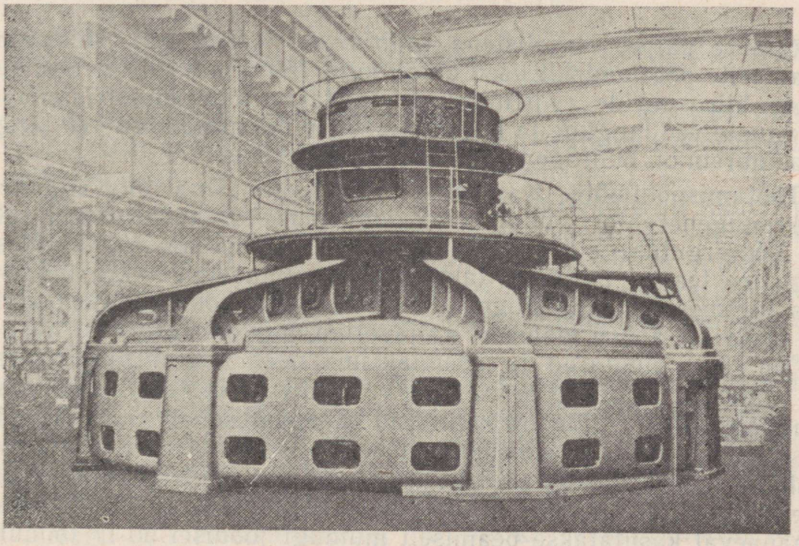
Kui aga $p \geqslant 3$, siis rootori ringkiirus väheneb ja valmistamise lihtsuse seisukohalt on parem kasutada nähtavate poolustega rootorit (joon. 20-14).



Joon. 20-14. Kolmefaasilise nähtavate poolustega sünkroonmasina rootor; võimsus 15 000 kVA, pöörlemiskiirus 750 p/min. Pooluskingades on näha summutusmähis

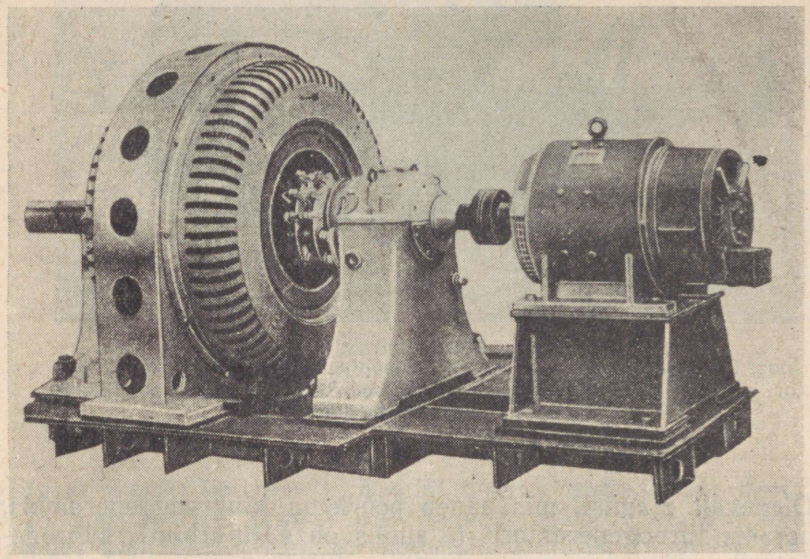
Olenevalt ajamist, mis paneb pöörlema sünkroongeneraatori, eristatakse turbogeneraatorit (ajamiks on auruturbiin), hüdrogeneraatorit (ajamiks on vesiturbiin) ja diiselgeneraatorit (ajamiks on diiselmootor).

Turbogeneraatorid (nähtamatute poolustega) on kiirekäiguli-



Joon. 20-15. Hüdrogeneraator

sed ja neid valmistatakse tavaliselt kahe, harvemini neljapooluselistena. Hüdrogeneraatorid (joon. 20-15) ja diiselgeneraatorid (joon. 20-16) on aeglase pöörlemiskiirusega masinad ja nad val-

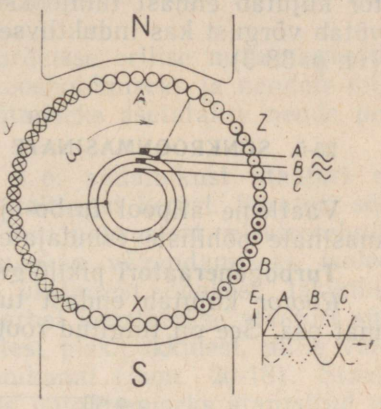


Joon. 20-16. Kolmefaasiline nähtavate poolustega sünkroongeneraator, tüüp C-1504-8; esiplaanil ergutusmasin

mistatakse paljupooluselistena (nähtavate poolustega). Hüdrogeneraatorite pöörlemiskiirused on 50 kuni 750 p/min piires. Selliste laiade kiiruspiiride esinemine on seletatav hüdroelektrijaamade erisuguste vee langude ja kogustega — mida suurem on vee lang, seda suurem on hüdrogeneraatori pöörlemiskiirus.

Töötamispõhimõte. Käsitleme sünkroonmasina tööpõhimõtet sünkroongeneraatori puhul. Sünkroongeneraatori tööpõhimõte selgub võõrergutusega alalisvoolugeneraatori tööpõhimõtet jälgides. Nagu me teame, indutseeritakse alalisvoolumasina ankru mähise igas juhtmes vahelduvpinge, mis alaldatakse kommutaatori abil. Kui teeksime ankru mähisest väljavõtted, mis on üksteisest nurga $360°/m$ võrra nihutatud ja ühendaksime need kontaktrõngastega, siis saaksime rõngastel m-faasilise vahelduvvoolu. Selgituseks vaatame joonist 20-17, kus on kujutatud kahepooluseline masin silindrilise ankruga ja lihtsa silmusmähisega. Kolmefaasilise vahelduvvoolumähise saamiseks on tehtud suletud ankrumähisest iga 120° järel väljavõtted, mis on ühendatud elektriliselt kontaktrõngastega. Tänapäeval kasutatakse peamiselt muidugi joonisel 20-17 toodule vastupidist põhielementide asetust, s. o. ankru mähis asetseb staa-

toril ja ergutusmähis rootoril. See on tingitud sellest, et käesoleval ajal ehitatakse sünkroongeneraatoreid pingetele kuni 16 kV ja isegi 35 kV ning vooludele tuhandeid ampreid. Loomulikult kujuneb kontaktrõngaste töö niisugustes tingimustes keerukaks. Ergutusvoolu juhtimine läbi kontaktrõngaste ei tekita aga erilisi raskusi, sest ergutuseks kulutatav võimsus ei ületa tavaliselt 1 ... 2% masina nimivõimsusest. Ergutuseks vajalik alalisvool saadakse tavaliselt alalisvoolugeneraatorist, mis asub sünkroongeneraatoriga ühisel võllil (joon. 20-16) või käitatakse erimootoriga.



Joon. 20-17. Väliste liikumatute poolustega kolmefaasilise sünkroonmasina põhimõtteskeem

Ergutatud rootori pöörlemisel indutseeritakse üksikutes faasimähistes suuruselt võrdsed, kuid üksteise suhtes ajaliselt 120° nihutatud elektromotoorsed jõud, mis moodustavad sümmeetrilise süsteemi (samuti nagu joonisel 20-17 kujutatud pöörleva ankruga masinas). Vahelduvpinge sagedus f kahepooluselise generaatori korral ($p = 1$) võrdub rootori pöörlemiskiirusega n p/sec.

Kui generaatori pooluspaaride arv $p > 1$, siis ühele rootori pöördele vastab p emj. perioodi ja emj. sagedus

$$f = pn. \qquad (20\text{-}8)$$

Sünkroongeneraatori koormamisel tekivad staatori mähises voolud, mis kolmefaasilise mähise korral tekitavad pöörleva magnetvälja, nagu see esineb asünkroonmasinaski.

Staatori magnetvälja suund ja kiirus ühtivad alati rootori pöörlemissuuna ja kiirusega, mistõttu seda masinat nimetataksegi sünkroonmasinaks. See nähtus seletub sellega, et indutseeritud emj. ja seega ka voolu sagedus on kindlalt määratud seosega (20-8), voolu poolt tekitatud resulteeriva magnetvälja pöörlemiskiirus aga seosega (20-1).

Kuna staatori ja rootori magnetväljad staatori suhtes liiguvad, siis valmistatakse viimane rauaskadude vähendamiseks üksikutest elektrotehnilisest terasest stantsitud lehtedest (analoogiliselt asünkroonmasinaga). Rootorit aga, mille suhtes magnetväljad seisavad paigal, võib valmistada ka massiivsena.

Nagu kõik elektrimasinad, nii võib ka sünkroonmasin töötada mootorina. Sünkroonmootori väärtuslikuks omaduseks on see, et

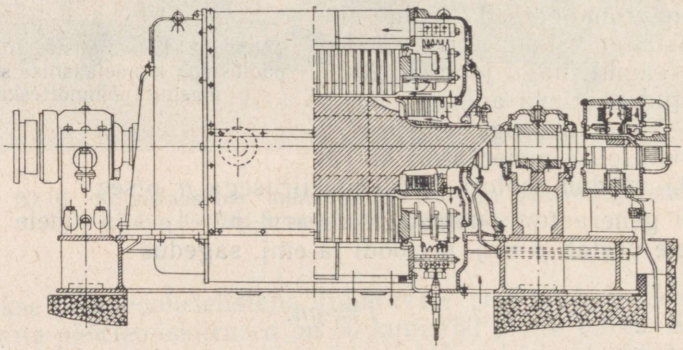
olenevalt ergutusvoolu suurusest võib ta põhimõtteliselt töötada mistahes $\cos \varphi$ juures, seejuures ka $\cos \varphi = 1$ juures. Sünkroonmasinaid kasutatakse laialdaselt sünkroonkompensaatoritena võrgu võimsusteguri ($\cos \varphi$) parandamiseks. Sünkroonkompensaator kujutab endast tühijooksul töötavat sünkroonmootorit, mis võtab võrgust kas induktiivse või mahtuvusliku iseloomuga voolu (vt. p. 38-3).

20-5. SÜNKROONMASINATE KONSTRUKTSIOON

Vaatleme allpool turbo- ja hüdrogeneraatorite kui sünkroonmasinate põhiliste esindajate konstruktiivset kujundust.

Turbogeneraatori pikilõige on toodud joonisel 20-18.

Rootor kujutab endast turbogeneraatori kõige vastutusrikkamat osa. See on tingitud rootori suurest ringkiirusest, mis ulatab



Joon. 20-18. Kolmefaasiline turbogeneraator; võimsus 1500 kVA, pinge 6300 V, pöörlemiskiirus 3000 p/min

kuni 170 m/sec. Mehaanilise vastupidavuse suurendamiseks valmistatakse rootorid tavaliselt ühest terviklikust sepisest, millesse freesitakse rootori uurded. Sepiste läbimõõt võib seejuures ületada 1 m ja aktiivosa pikkus 6,5 m ning nende kaal on 50 ... 120 tonni piirides. Näitena võib tuua tehase «Elektrosila» 100 MW võimsusega ja 3000 p/min pöörlemiskiirusega turbogeneraatori rootorit: selle läbimõõt $D = 0{,}99$ m, pikkus $l = 6{,}35$ m, ringkiirus rootori pöörlemiskiirusel 3600 p/min (kontrollkatsetamisel), $v = 186$ m/sec.

Ergutusmähis asetatakse rootorisse freesitud uuretesse. Üldiselt haarab uurestatud osa rootorist enda alla ligikaudu $^2/_3$ rootori ümbermõõdust. Umbes $^1/_3$ rootori ümbermõõdust jäetakse

uurestamata ja seda osa mööda läheb põhiline osa magnetvoost. Rootori ergutusmähise materjalina kasutatakse tavaliselt vaske. Kuid rootori läbimõõtudel 1 m ümber on rootori mehaanilise tugevuse seisukohast soovitav kasutada ergutusmähisena alumiiniumi, mille kaal on peaaegu kaks korda väiksem sama oomilise takistusega vaskmähise kaalust.

Rootori mähis kinnitatakse uurdeisse erilise mittemagnetilise metallkiilu abil. Laupühenduste kooshoidmiseks ja nendele mõjuvate tsentrifugaaljõudude vastuvõtmiseks asetatakse nende peale metallvõru.

Staator koosneb aktiivosast, s. o. südamikust staatori mähisega, ja staatorit ning rootorit kaitsvast kerest. Staatori südamik stantsitakse tavaliselt 0,5 mm paksustest elektrotehnilise terase lehtedest Э21 või Э31. Rauaskao vähendamiseks isoleeritakse üksikud staatori teraslehed üksteisest õhukese lakikihiga. Turbogeneraatori jahutamise otstarbel koostatakse staatori südamik üksikutest 3 . . . 6 cm paksustest plekipakkidest, mille vahele jäetakse 1 cm laiune ventilatsioonikanal (joon. 20-18). Staatori õhupilu-poolsesse külge on mähise paigutamiseks stantsitud uurded, mis vajaliku ristlõikega mähise paigutamiseks on tavaliselt suhteliselt sügavad. Nii on näiteks tehases «Elektrosila» valmistatud 50-MW turbogeneraatori uurde sügavus 18 cm.

Turbogeneraatorite *ventilatsioon* kujutab endast üht tõsisemat probleemi, eriti suure võimsusega (mõnisada megavatti) turbogeneraatorite korral. Tõepoolest, nagu nägime eespool, on rootori läbimõõtu võimalik suurendada mehaanilise tugevuse seisukohalt kuni teatava piirini. Seepärast on võimalik suurendada teatava piirini ka turbogeneraatori võimsust tavalise õhkjahutuse korral, mis on võrdeline korrutisega D^2l (kus D — rootori läbimõõt, l — rootori pikkus). Edasine võimsuse suurendamine sama gabariitmõõtmete korral saab juba võimalikuks ainult uute ventilatsioonisüsteemide kasutusele võtmisega. Näiteks turbogeneraatoritel võimsusega kuni 50 MW kasutatakse õhkjahutust, võimsusega 50 . . . 100 MW — vesinikjahutust vesiniku absoluutsel rõhul 1 ata, võimsusel 150 MW — vesinikjahutust rõhul 1,5 ata ning võimsustel 250 . . . 300 MW — juhtmete sisemist vesinikjahutust rõhul kuni 3,5 ata. Vesiniku paremad jahutamisomadused seletuvad tema parema soojusliku erijuhtivusega, mis on 7,4 korda suurem õhu soojuslikust erijuhtivusest.

Tabelis 20-3, *a* on toodud iseloomustavad andmed mõningate turbogeneraatorite kohta. Siin D — staatori siseläbimõõt, l — aktiivosa pikkus, v — rootori ringkiirus, δ — õhupilu suurus, G_t — kaal võimsusühiku kohta.

Huvitav on siinkohal märkida, et sünkroonmasinate võimsuse suurenemisel väheneb väga tunduvalt masina kaal võimsusühiku kohta G_t.

Tabel 20-3

Tehases «Elektrosila» valmistatud sünkroongeneraatorite põhiandmed sagedusel $f = 50$ Hz

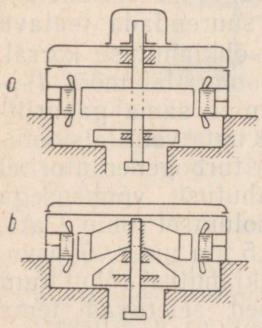
a) Turbogeneraatorid, $n = 3000$ p/min, $p = 1$

Nr.	P MW	U kV	$\cos\varphi$	D cm	l cm	v m/sec	δ mm	η %	G_t kg/kVA
1	1,5	6,3	0,8	60	100	94	12,5	94,5	6,5
2	12	6,3	0,8	60	175	137	25	96,3	
3	25	6,3	0,8	87	270	137	28	97,5	kuni 5,5
4	50	10,5	0,85	107,5	310	169	42,5	97,6	
5	100	15,75	0,90	109,5	635	172	52,5	98,1	2,2

b) Hüdrogeneraatorid

Nr.	P MW	U kV	n p/min	p —	$\cos\varphi$	D cm	l cm	v m/sec	δ mm	G_t kg/kVA
1	8,75	11	75	80	0,8	800	72	33	10	27,4
2	15	6,6	167	36	0,8	500	80	47,6	19	12,85
3	20	11	187,5	32	0,8	496	90	53,5	17	10,25
4	30	11	75	80	0,8	855	170	33,6	—	17,8
5	77,5	13,8	88,2	68	0,8	1045	153	50,8	19	10,7

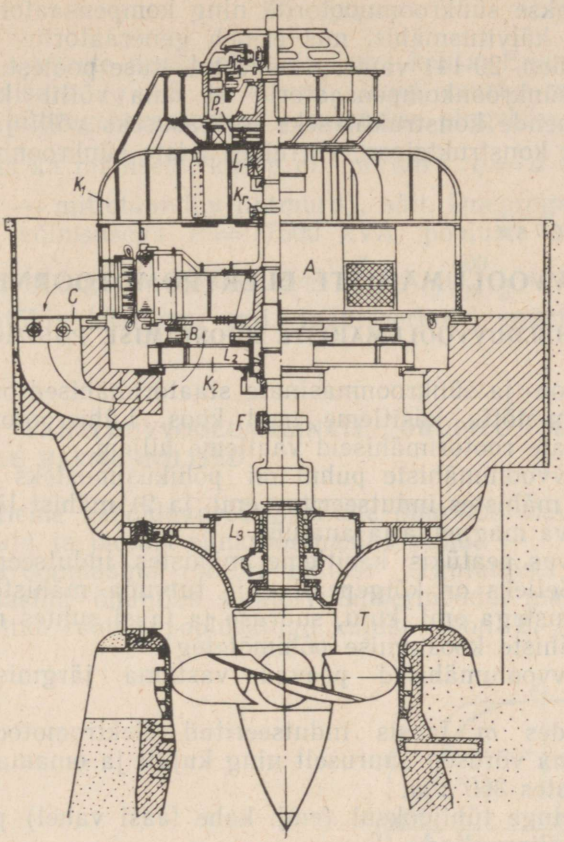
Hüdrogeneraatorite konstruktsioon erineb väga tunduvalt turbogeneraatori omast. See on tingitud vesiturbiini vertikaalsest asetusest, mistõttu hüdrogeneraatorid valmistatakse vertikaalse võlliga, ning vesiturbiini väikesest pöörlemiskiirusest. Väikese pöörlemiskiiruse tõttu tuleb hüdrogeneraator valmistada paljupooluselisena, mis suurendab viimase gabariitmõõtmeid (eriti läbimõõtu). Konstruktiivse kujunduse järgi jagunevad hüdrogeneraatorid rippuvat tüüpi (joon. 20-19, *a*) ning lamavat tüüpi (joon. 20-19, *b*) masinateks. Rippuvat tüüpi generaatori korral võtab rootori raskuse enda kanda ülemine tugilaager. Lamavat tüüpi generaatori korral aga ülemine tugilaager puudub ning rootor toetub tugilaagrile, mis asub rootori poolusratta all. Seetõttu omavad viimast tüüpi hüdrogeneraatorid väiksemat kõrgust ning väiksemat rootori kaalu.



Joon. 20-19. Rippuvat tüüpi (*a*) ning lamavat tüüpi (*b*) hüdrogeneraatorid

Joonisel 20-20 on näitena toodud rippuvat tüüpi hüdrogeneraatori A läbilõige (generaator on sidurdatud Kaplan-turbiiniga T).

Hüdrogeneraatori konstrueerimisel on raskeimaks ülesandeks



Joon. 20-20. Kolmefaasiline hüdrogeneraator *A* siduratud Kaplan-turbiiniga *T*:

L_1, L_2, L_3 — juhtlaagrid, P_1 — tugilaager, K_1 — tugilaagri kandja, K_2 — elektromagnetilise siduri kandja, *B* — elektromagnetiline pidur, K_r — kontaktrõngad, *C* — vesijahuti, *F* — sidur

tugilaagri kujundamine. See on tingitud suurest raskusjõust, mida tugilaager peab vastu võtma.

Hüdrogeneraatorite ventilatsioon ei tekita tavaliselt raskusi, sest suurte jahutuspindade tõttu on soojuslik erikoormus pinnaühiku kohta mõõdukais piires.

Tabelis 20-3, *b* on toodud mõningate hüdrogeneraatorite põhiandmed.

Nähtavate poolustega sünkroonmootorid ja sünkroonkompensaatorid on üldiselt samasuguse konstruktsiooniga kui nähtavate poolustega generaatorid. Paremate käivitusomaduste saavutami-

seks asetatakse sünkroonmootorite ning kompensaatorite pooluskingadesse käivitusmähis, mis erineb generaatorite summutusmähisest (joon. 20-14) vaid suurema takistuse poolest.

Kuna sünkroonkompensaatorid ei oma võllil koormusmomenti, on nende konstruktiivseks iseärasuseks võlli ja tugilaagrite nõrgem konstruktsioon, võrreldes teiste sünkroonmasinatega.

XXI PEATÜKK

VAHELDUVVOOLUMÄHISTE ELEKTROMOTOORNE JÕUD

21-1. VAHELDUVVOOLUMÄHISTE KOOSTAMISE PÕHIMÕTTEID

Asünkroon- ja sünkroonmasinate staatorimähised on põhiliselt sarnased, mistõttu käsitleme neid koos. Lühisrootoriga asünkroonmasinate rootorimähiseid vaatleme hiljem.

Vahelduvvoolumähiste puhul on põhiküsimusteks 1) pöördvälja poolt mähistes indutseeritav emj. ja 2) mähist läbiva voolu poolt loodava magnetvälja analüüs.

Käesolevas peatükis käsitleme mähistes indutseeritava emj. küsimust. Selleks on kõigepealt vaja tutvuda mähistele esitatavate tingimustega emj. kuju, suuruse ja faasi suhtes ning vahelduvvoolumähiste koostamise põhimõtetega.

Vahelduvvoolumähised peavad vastama järgmistele põhinõuetele:

1) kõikides m faasis indutseeritud elektromotoorsed jõud peavad olema võrdsed suuruselt ning kujult ja omama faasinihet üksteise suhtes $360° : m$;

2) liinipinge tühijooksul (emj. kahe faasi vahel) peab olema praktiliselt siinuseline;

3) üksikute faasimähiste parameetrid (aktiiv- ja induktiivtakistused) peavad olema võrdsed;

4) mähis peab vastama nõutavatele pingetele, mehaanilistele jõududele ja soojenemisele.

Mähis koosneb isoleeritud juhtmetest koostatud poolidest, mis on paigutatud Z uurdesse. Poolusejaotuse τ kohta tuleb $Q = \frac{Z}{2p}$ uuret. Kuigi põhilisteks on kolmefaasilised mähised, võib üldisema juhtumina vaadelda m-faasilist mähist, mille poolusejaotuse ulatusel asub m faasitsooni. Niisuguse mähise iga faasitsooni kohta tuleb

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{Q}{m} \tag{21-1}$$

uuret, kus q on uurete arv pooluse ja faasi kohta. Seega m-faasilise ja p pooluspaariga masina üldine uurete arv

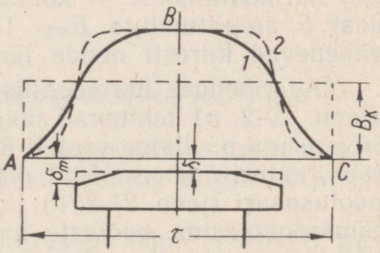
$$Z = 2pqm, \qquad (21\text{-}2)$$

kus q — uurete arv pooluse ja faasi kohta. Enamikul mähistest on q täisarv ($q = 2$ ja enam). Kuid suurtes madala pöörete arvuga hüdrogeneraatorites kasutatakse pingekõvera kuju parandamiseks ka mähiseid, kus q on murdarv: $q = a + \frac{b}{c}$ (a — täisarv, b/c — mittetaanduv lihtmurd), näit. Dneprogessi hüdrogeneraatoril võimsusega $P = 77500$ kVA, pooluste arvuga $2p = 68$ ja uurete arvuga $Z = 600$ on $q = \frac{Z}{2pm} = \frac{600}{2 \cdot 68 \cdot 3} = 2\,{}^{16}/_{17}$. Käesolevas peatükis käsitleme emj. indutseerimist mähistes, kus q on täisarv.

21-2. VAHELDUVVOOLUMASINATE ÕHUPILU MAGNETVÄLI JA SELLE HARMOONILISED

Vaatleme vahelduvvoolumasinate õhupilus oleva põhimagnetvälja kuju ja jaotust sünkroonmasina puhul.

Sünkroonmasina rootori mähise ergutamisel alalisvooluga tekib masina õhupilus staatori ümbermõõdul magnetväli, mille kuju sõltub rootori pooluskinga kujust (joon. 21-1). Pooluskinga



Joon. 21-1. Rootori ühe pooluse poolt tekitatud magnetvälja tiheduse jaotus staatori ümbermõõdul

ulatuses ühtlase õhupilu δ puhul omab magnetiline induktsioon joonisel 21-1 kõveraga *2* näidatud kuju. Magnetvälja tiheduse jaotusele staatori ümbermõõdul püütakse anda siinuselist kuju, mida saavutatakse õhupilu suurendamisega pooluskinga otste suunas. Magnetvälja tiheduse jaotust pooluskinga otste kallutamise puhul näitab joonisel 21-1 kõver *1*. Nähtavate poolustega sünkroonmasinates kujundatakse poolusking raadiusega, mis on väiksem kui staatori siseläbimõõt, nii et maksimaalne õhupilu pooluskinga serval $\delta_m = (1{,}5 \ldots 2)\delta$. Turbogeneraatorites saavutatakse siinusele lähedane väljajaotus rootori mähise vastava paigutamisega uuretesse.

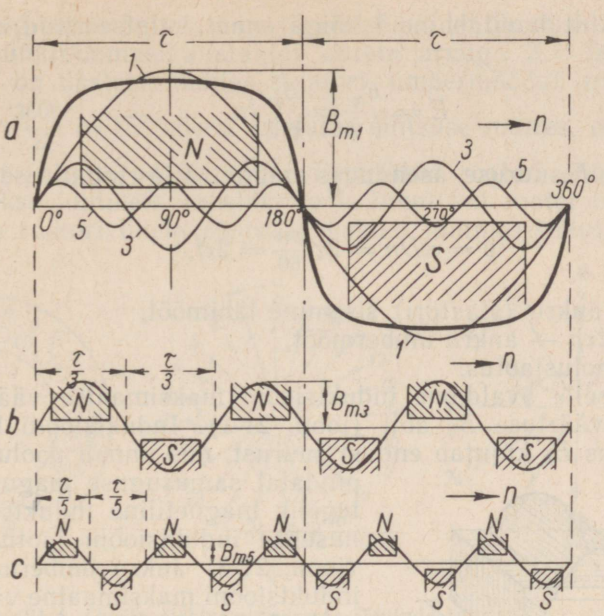
Tegelikkuses erineb sünkroonmasina õhupilu magnetvälja

kõvera kuju siiski siinuselisest jaotusest (joon. 21-1). Seejuures kordub antud kõvera kuju kõigi pooluste juures, muutes vaid erineva polaarsusega pooluste korral suunda. Niisugust jaotuskõverat nimetatakse perioodiliseks. Kuna sünkroonmasina kõik poolused tekitavad ühesuguse magnetvälja, siis on magnetilise induktsiooni kõver sümmeetriline oma alustelje (abstsisstelje) suhtes. Sellist perioodiliselt muutuvat kõverat võib kujutada koosnevana üksikuist siinuseliselt muutuvaist kõveraist, nn. harmoonilistest. Olenevalt muutumise perioodist jagunevad harmoonilised põhi- ja kõrgemateks harmoonilisteks. Kuna kujutatud magnetväli muutub ruumiliselt staatori ümbermõõdul, siis nimetatakse ka tekkivaid harmoonilisi ruumilisteks, erinevalt ajalistest harmoonilistest (näit. vool, emj.), mis muutuvad olenevalt ajast. Põhiharmooniliseks nimetatakse siinuseliselt muutuvat kõverat, mille muutumise periood võrdub poolusejaotusega τ. Kõrgema harmoonilise ν muutumise periood on pöördvõrdeline harmoonilise järguga, s. o. τ/ν. Harmooniliselt muutuvat kõverate rida nimetatakse Fourier' reaks. Niisugune kõver, mis on sümmeetriline kõverat läbiva kesktelje ja alustelje suhtes, koosneb paarituarvulistest siinuseliselt muutuvaist harmoonilistest.

Joonisel 21-2 on näitena toodud induktsiooni kõvera (jämeda joonega) lahutamine harmoonilisse ritta. Lihtsuse mõttes koosneb kõver ainult põhiharmoonilisest *1* amplituudiga B_{m1} ja kõrgematest harmoonilistest — kolmandast *3* amplituudiga B_{m3} ja viiendast *5* amplituudiga B_{m5}. Tavaliselt harmooniliste amplituudid vähenevad kiiresti nende järjekorranumbri suurenemisega.

Väljatiheduse harmoonilised amplituudidega B_{m1}, B_{m3}, B_{m5} ... (joon. 20-2, *a*) tekitavad magnetvood Φ_1, Φ_3 ja Φ_5. Kuna väljakõvera iga poollaine vastab ühele poolusele, siis voog Φ_1 moodustab staatori ümbermõõdul p pooluspaari (joon. 21-2, *a*), $\Phi_3 - 3p$ pooluspaari (joon. 21-2, *b*) ja $\Phi_5 - 5p$ pooluspaari (joon. 21-2, *c*). Sünkroonmasina pooluste magnetvälja harmoonilised pöörlevad kõik sama, nimelt pooluse enda kiirusega n. Rootori pöörlemisel kiirusega n indutseerib Φ_1 magnetvoog juhtmes emj. e_1 põhisagedusega $f = pn$. Magnetvoog Φ_3 ja Φ_5 indutseerivad juhtmes emj. e_3 ja e_5 sagedusega $3pn = 3f$ ja $5pn = 5f$.

Kõrgemad harmoonilised avaldavad kahjulikku mõju, mis seisab selles, et nad moonutavad emj. kõvera kuju. Moonutatud pingekõvera kuju kutsub aga esile lisakadusid elektriliinides ja toidetavais masinais ning aparaatides, resonantsinähtusi elektriliinides, häireid nendega paralleelselt asuvais sideliinides jm. Seepärast püütakse mähise ja pooluskingade vastava kujundamisega viia emj. kõrgemate harmooniliste mõju miinimumini. Kuna kõrgemate harmooniliste mõju emj. suurusele on väike, siis vaatame hiljem emj. indutseerimist vahelduvvoolumähistes vaid siinuselise magnetvälja jaotuse korral.



Joon. 21-2. Väljatiheduse kõvera lahutamine harmoonilisse ritta (*a*) ja rootori mudelid, mis tekitavad väljatiheduse kolmanda ning viienda harmoonilise (*b* ja *c*)

21-3. JUHTMES INDUTSEERITUD ELEKTROMOTOORSED JÕUD

Vaatame emj. indutseerimist ühes staatorimähise juhtmes nähtavate poolustega sünkroongeneraatori õhupilu magnetvälja siinuselise jaotuse korral.

Rootori pöörlemisel ühtlase nurkkiirusega tekib pöördväli, mis, möödudes staatori uurdes asuvast juhtmest, indutseerib viimases emj., mille maksimaalne väärtus

$$E_m = B_m l v, \tag{21-3}$$

kus B_m — magnetilise induktsiooni maksimaalväärtus antud punktis vaadeldaval hetkel,

l — juhtme aktiivosa pikkus,

v — magnetvälja ringkiirus.

Juhtmes indutseeritava emj. sagedus rootori pöörlemisel kiirusega n p/min ja pooluspaaride arvu p korral

$$f = \frac{pn}{60}. \tag{21-4}$$

Tegelikult huvitab meid kõige enam indutseeritud emj. efektiivväärtus

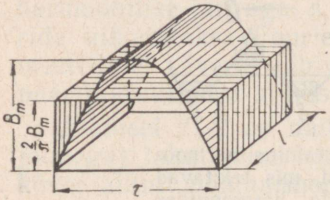
$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{B_m}{\sqrt{2}} lv. \qquad (21\text{-}5)$$

Leiame E suuruse, asendades magnetvälja ringkiiruse v avaldisega

$$v = \pi Dn = 2\tau \frac{pn}{60} = 2\tau f, \qquad (21\text{-}6)$$

kus D — ankru (staatori) sisemine läbimõõt,
$\pi D = 2\tau p$ — ankru ümbermõõt,
τ — poolusjaotus.

Peale selle avaldame induktsiooni maksimaalse väärtuse B_m tema keskväärtuse B_k abil (joon. 21-1). Induktsiooni kõvera B keskväärtus B_k kujutab endast suurust, mis annab poolusejaotuse pindalal samusuguse magnetvoo kui tegelik magnetiline induktsioon. Siinuselise induktsiooni jaotuse korral (joon. 21-3) ankru ümbermõõdul on induktsiooni maksimaalne väärtus B_m ja keskväärtus B_k omavahel seotud järgmiselt:



Joon. 21-3. Magnetvoo määramine siinuseliselt jaotatud magnetvälja väljatiheduse maksimaalväärtuse B_m ja keskväärtuse B_k põhjal

$$B_m = \frac{\pi}{2} B_k. \qquad (21\text{-}7)$$

Asetades saadud avaldised (21-6) ja (21-7) valemisse (21-5), saame emj. efektiivväärtuse kohta avaldise

$$E = 2 \frac{\pi}{2\sqrt{2}} B_k l\tau f = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi f = 2{,}22 \Phi f, \qquad (21\text{-}8)$$

kus

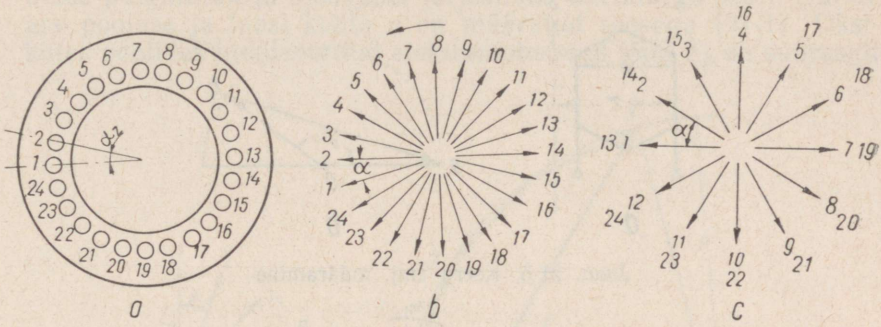
$$\Phi = B_k l \tau \qquad (21\text{-}9)$$

kujutab endast poolusest väljuva magnetvoo väärtust.

21-4. UURDE ELEKTROMOTOORSETE JÕUDUDE TÄHT

Siinuselise magnetvälja korral võib üksikuis uurdeis asuvate juhtmete elektromotoorseid jõude kujutada vektoritena, mis pöörlevad nurkkiirusega $\omega = 2\pi f$ ja on üksteise suhtes nihutatud nurga $\alpha = \frac{p\,360^\circ}{Z}$ võrra.

Üeldu selgitamiseks vaatame järgmist näidet. Joonisel 21-4 on kujutatud sünkroonmasina staator uurete arvuga $Z = 24$. Üksikud uurded on üksteise suhtes staatori ümbermõõdul nihutatud nurga $\alpha z = \frac{360°}{Z} = 15°$ võrra. Oletame lihtsuse mõttes, et igasse uurdesse on paigutatud üks juhe. Ergutatud rootori pöörlemisel indutseeritakse juhtmeis vahelduvvool. Juhul kui rootor omab $2p$ poolust, siis rootori ühele pöördele vastab juhtmes indutseeritud



Joon. 21-4. Uurde elektromotoorsete jõudude täht:
a — staator $Z = 24$; *b* — uurde elektromotoorsete jõudude täht juhul, kui $p = 1$;
c — sama, kui $p = 2$

emj. p perioodi, ehk teisiti — rootori pöördele 360° võrra (ruumis) vastab vektordiagrammil emj. vektori pöördenurk $p \cdot 360°$ (elektrilist kraadi). Seega ruumis nurgale üks kraad vastab vektordiagrammil p elektrilist kraadi. Kui me kanname vektordiagrammile kõik Z uurde emj. vektorid, teeme ringi ümbermõõdul p pööret, mis vastab nurgale $\alpha Z = p\alpha_z Z = p \cdot 360°$ (elektrilist kraadi). Joonisel 21-4,*b* on toodud uurde emj. vektordiagramm juhul, kui $p = 1$, $\alpha = \alpha_z$, ja joonisel 21-4, *c* juhul, kui $p = 2$, $\alpha = p\alpha_z$.

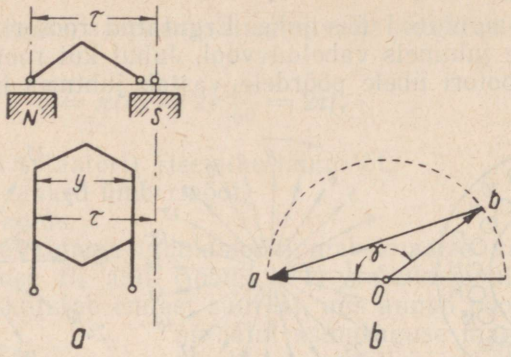
Siin vaadeldud uurdes asuvate juhtmete elektromotoorsete jõudude vektordiagrammi nimetatakse lühidalt uurde emj. täheks.

Uurde emj. tähe abil on kerge leida ühe keeru, pooli ja mähise ühe faasi elektromotoorset jõudu.

21-5. KEERU, POOLI, POOLIGRUPI JA MÄHISE FAASI ELEKTROMOTOORSED JÕUD

Keeru emj. kujutab endast kahes eraldi uurdes asuvas juhtmes indutseeritud emj. geomeetrilist vahet, sest keeru moodustamiseks ühendatakse omavahel kokku juhtmete algused ja lõpud, s. o. juhtmetes indutseeritud elektromotoorsed jõud on suunatud üksteisele vastu. Selleks et keeru emj. oleks võimalikult suur,

ühendatakse omavahel kokku juhtmed, mis asuvad ligikaudu poolusejaotuse τ kaugusel ($y \approx \tau$) (joon. 21-5, *a*). Kahe juhtme vahelist kaugust, mis moodustavad ühe keeru, nimetatakse *keeru sammuks* (laiuseks) y.



Joon. 21-5. Keeru emj. määramine

Tänapäeval kasutatakse peamiselt lühendatud sammuga mähiseid ($y < \tau$). Niisuguse mähise ühe keeru emj. efektiivväärtus (vektor $\overline{ab}$ joonisel 21-5, *b*)

$$E = 2\overline{oa} \sin \frac{\gamma}{2} = 4{,}44 f k_y \Phi, \qquad (21\text{-}10)$$

kus

$$\gamma = \frac{y}{\tau} \cdot 180° = \beta \cdot 180°$$

on juhtmete elektromotoorsete jõudude vaheline nurk ($\beta = \frac{y}{\tau}$ — suhteline mähise samm) ja

$$k_y = \sin \beta \cdot 90° \qquad (21\text{-}11)$$

mähise sammu tegur.

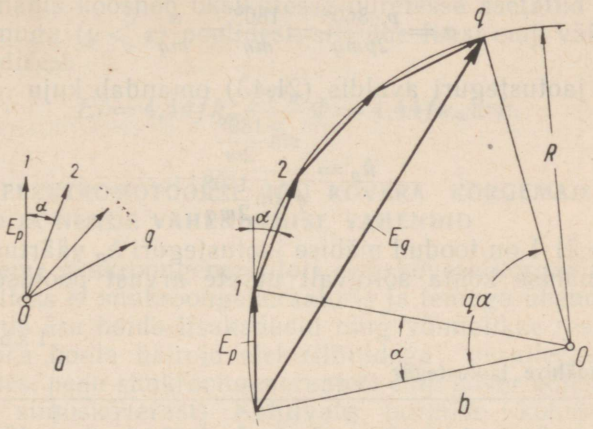
Kui keeru samm on lühendatud $^1/_6\tau$ võrra, siis $\beta = {}^5/_6$ ning $k_y = \sin \frac{5}{6} \cdot 90° = \sin 75° = 0{,}966$. Seega võrreldes täissammu keeruga ($\beta = 1$) kaotame emj. suuruses $\frac{1 - 0{,}966}{1} \cdot 100 = 3{,}4\%$, s. o. võrdlemisi väikese osa.

Pooli emj. Juhul kui uurdes on järjestikku ühendatud s_u keerdu, mis moodustavad pooli, suureneb emj. vastavalt keerdude arvule ja tema efektiivväärtus

$$E_p = 4{,}44 f s_u k_y \Phi. \qquad (21\text{-}12)$$

Pooli grupi emj. Emj. väärtuse suurendamiseks ja indutseeritud emj. kuju lähendamiseks siinusele ühendatakse mitu kõrvuti asuvat pooli järjestikku. Esialgu selgitame, kuidas mõjub üksikute poolide järjestikku ühendamine nn. pooligruppideks emj. suurusele. Mõju emj. kõvera kujule käsitleme hiljem.

Mitmefaasilise mähise puhul (faaside arvuga m), mis moodustab staatori ümbermõõdul p pooluspaari ja on paigutatud Z uurdesse, moodustavad ühe pooligrupi q kõrvuti asetsevasse uurdesse paigutatud ja omavahel järjestikku ühendatud pooli. Uurete arv pooluse ja faasi kohta q on määratud seosega (21-1). Üksikutes poolides indutseeritud elektromotoorsed jõud E_p on suuruselt



Joon. 21-6. Jaotusteguri määramine

võrdsed, kuid nihutatud üksteise suhtes nurga $\alpha = \frac{p \cdot 360°}{Z}$ (elektrilise kraadi) võrra (joon. 21-6, *a*). Pooligrupi emj. suuruse E_g saame poolide elektromotoorsete jõudude geomeetrilisel liitmisel, mis on toodud joonisel 21-6, *b*. Joonestame q pooli elektromotoorsete jõudude vektoritest E_p moodustatud hulknurga ümber ringjoone raadiusega R.

Diagrammi (joon. 21-6, *b*) põhjal on üksiku pooli emj.

$$E_p = 2R \sin \frac{\alpha}{2},$$

pooligrupi resulteeriv emj. aga omab väärtuse

$$E_g = 2R \sin \frac{q\alpha}{2},$$

kus R — ümberjoonestatud ringjoone raadius.

Elektromotoorsete jõudude geomeetrilise ja algebralise

summa suhe, mida nimetatakse *mähise jaotusteguriks*, on seega

$$k_p = \frac{E_g}{qE_k} = \frac{\sin q\frac{\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}. \qquad (21\text{-}13)$$

Avaldisest (21-13) järeldub, et mähise jaotustegur sõltub uurete arvust pooluse ja faasi kohta q ning nurgast α kõrvuti asuvate uurete vahel. Mitmefaasilise mähise korral (faaside arvuga m) on pooligrupi elektromotoorset jõudu moodustavate vektorite vaheline nurk

$$\alpha = \frac{p\cdot 360^\circ}{2pmq} = \frac{180^\circ}{mq} = \frac{\pi}{mq}$$

ja mähise jaotusteguri avaldis (21-13) omandab kuju

$$k_p = \frac{\sin\frac{180^\circ}{2m}}{q\cdot\sin\frac{180^\circ}{2mq}}. \qquad (21\text{-}14)$$

Tabelis 21-1 on toodud mähise jaotusteguri k_p väärtused kolmefaasilise mähise kohta sõltuvalt uurete arvust pooluse ja faasi kohta q.

Tabel 21-1

Kolmefaasilise mähise jaotustegur

q	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ühtlaselt jaotatud mähis
Q	6	9	12	15	18	21	24	27	30	
k_{p1}	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,957	0,956	0,955	0,955	0,955

Seega ühe pooligrupi, mis koosneb qs_u järjestikku ühendatud keerust, emj. suurus suureneb võrreldes ühe pooli emj.-ga q korda, kuid väheneb teguri k_p võrra. Valemite (21-12) ja (21-13) põhjal võime q uurdesse paigutatud pooligrupi emj. jaoks kirjutada avaldise

$$E_g = k_p qE_p = 4{,}44fk_pk_y qs_u\Phi = 4{,}44fk_w qs_u\Phi, \qquad (21\text{-}15)$$

kus korrutist

$$k_w = k_pk_y \qquad (21\text{-}16)$$

nimetatakse mähiseteguriks ja võtab arvesse nii mähise üksikutesse uuretesse jaotamise kui ka mähise poolide sammu lühendamise mõju emj. väärtusele.

Mitmefaasilise mähise ühe faasi emj. Selleks et saada mitmepooluselise masina mähise ühe faasi emj. avaldust, on vaja liita geomeetriliselt üksikute poolusepaaride all olevate pooligruppide elektromotoorsed jõud. Kui q on täisarv, siis masina kõigi poolus-paaride p all asuvad poolid on aheldatud ühesuguse magnetvooga (s.o. asuvad magnetvoo suhtes ühesugustes tingimustes) ja koosnevad ühesugusest keerdude arvust. Seega üldjuhul, kui on järjestikku ühendatud p poolide gruppi, millest on moodustatud a paralleelharu, on üldine keerdude arv faasis

$$w = \frac{pqs_u}{a}. \qquad (21\text{-}17)$$

Kui mähis koosneb üksikutesse uuretesse asetatud ja lühendatud sammuga ($y < \tau$) poolidest, siis ühe faasi emj. väärtus on leitav avaldisest

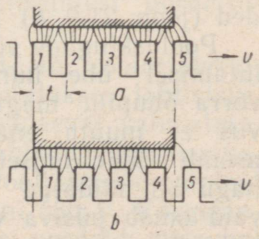
$$E_f = 4{,}44 f k_w \frac{pqs_u}{a} \Phi = 4{,}44 f k_w w \Phi. \qquad (21\text{-}18)$$

21-6. ELEKTROMOTOORSE JÕU KÕVERA KÕRGEMAD HARMOONILISED JA NENDE VÄHENDAMISE VAHENDID

Vaatleme sünkroongeneraatori emj. kõvera kõrgemaid harmoonilisi. Selleks et sünkroongeneraatoris ja temaga ühenduses olevas elektriliinis ära hoida lisakadusid ning võimalikke resonantsinähtusi ja ära hoida häireid elektriliinidega paralleelselt olevates sideliinides, peab sünkroongeneraatori emj. kõver võimalikult vähe erinema siinuskõverast. Kehtivate normide kohaselt (ГОСТ 183-55) loetakse vahelduvvoolugeneraatorite emj. kõver praktiliselt siinuseliseks, kui ükski selle kõvera ordinaat ei erine siinuskõvera vastavast ordinaadist üle 1000 kVA võimsusega generaatoritel mitte üle 5% ja 10 kuni 1000 kVA võimsusega generaatoritel — mitte üle 10%.

Kui sünkroongeneraator töötab tühijooksul, siis staatori mähise ühe juhtme või täissammuga keeru (ka pooli) emj. kõver on oma kujult sarnane õhupilu magnetvälja kõveraga (joon. 21-2) ja sisaldab peale põhiharmoonilise ka kõrgemaid harmoonilisi.

Peale õhupilu väljakõvera harmooniliste kutsub emj. kõvera moonutusi esile veel magnetvälja pulseerimine staatori uurdelisuse tõttu. Staatori uurdelise ehituse tõttu muutub staatori ja magnetpooluste vahelise õhupilu magnetiline juhtivus pidevalt mingi minimaalse ja maksimaalse väärtuse vahel, kutsudes seega esile ka magnetvoo pulseerimise. See nähtub joonisest 21-7, kus uurete ülemineku asendist a asendisse b muutub õhupilu juhtivus ja magnetvälja jaotus

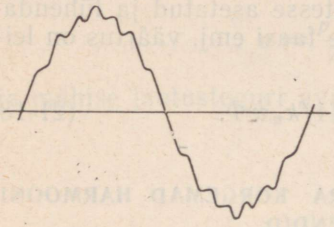


Joon. 21-7. Õhupilu magnetvälja jagunemine olenevalt uurete asendist

õhupilus. Magnetvoo pulseerimised on seda suuremad, mida väiksem on õhupilu laius. Rootori edasinihkumisele ühe uurde sammu t võrra (joon. 21-7) vastab magnetvoo muutumise üks periood. Kui rootor teeb staatori ümbermõõdul ühe täispöörde, siis magnetvoog läbib selle aja jooksul $2pqm$ perioodi. Kuna rootori pöörlemiskiirus on n pööret sekundis, siis magnetvälja pulseerimissagedus

$$f = 2pqmn = 2qmf = 2Qf.$$

Niisugune pulseeriv magnetväli indutseerib mähises kõrgesageduslikke elektromotoorseid jõude, mida nende tekkimise allika järgi nimetatakse emj. hamba-harmoonilisteks. Emj. hamba-harmoonilised, liitudes magnetvälja põhiharmoonilise poolt indutseeritud elektromotoorse jõuga, kutsuvad viimases esile moonutuse (hambulisuse) (joon. 21-8).



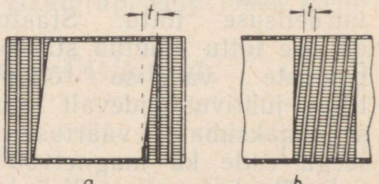
Joon. 21-8. Emj. kõvera kuju moondumine hamba-harmooniliste mõju tõttu

Emj. harmooniliste vähendamiseks kasutatakse järgmisi tehnilisi võtteid.

Induktsioonikõvera harmooniliste mõju vähendamine ja seega emj. kõvera lähendamine siinuskõverale saadakse ühelt poolt pooluse ja faasi kohta uurete arvu q suurendamisega ning teiselt poolt mähise sammu y sobiva lühendamisega. Kuid kõrgemate harmooniliste mõju vähendamiseks pole tarvis valida eriti suurt q väärtust (tavaliselt $q = 3 \ldots 5$), sest induktsioonikõvera harmooniliste endi amplituud väheneb võrdeliselt harmoonilise järguga (ptk. XXIII). Vajaliku emj. kõvera kuju saamiseks on küllaldane vähendada 3., 5., 7., 9. ja 11. väljaharmoonilise mõju. Kolmanda ja kolmega kordsete väljaharmooniliste mõju emj. kõverale võime kõrvaldada kolmefaasilise mähise üksikute faaside ühendamisega tähte.

Magnetvoo pulseerimise vähendamiseks võib paigutada uurde sammu võrra kaldu pooluskingad (joon. 21-9, *a*) või staatori uurded (joon. 21-9, *b*) (väikese võimsusega masinad).

Pooluskingade või uurete kallutamisel ühe uurde sammu t võrra õhupilu magnetiline juhtivus ei muutu enam hammaste asendi muutumisel hüppeliselt, nagu oli näidatud joonisel 21-7, vaid omab püsiva väärtuse, mistõttu masina magnetvoog ei pulseeri ega kutsu enam esile emj. hamba-harmoonilisi.



Joon. 21-9. Pooluskingade (*a*) ja uurete kallutamine (*b*)

Suurtes sünkroonmasinates kasutatakse pooluskinga või uurete kallutamise asemel pooluskingade asendite muutmist üksteise suhtes ankru ümbermõõdul poole uurdejaotuse võrra.

Emj. hamba-harmoonilisi on võimalik tunduvalt vähendada ka nn. murdmähiste kasutamise korral. Murdmähiseks nimetatakse seejuures mähist, mille uurete arv pooluse ja faasi kohta q on murdarv. Nende mähiste puhul asetsevad ühte faasi moodustavad poolid üksikute pooluste all erinevates magnetilistes tingimustes, mistõttu üksikutes poolides indutseeritud elektromotoorsed jõud pole faasis. Selle tulemusena elektromotoorsete jõudude kõrgemate harmooniliste summa tunduvalt väheneb.

XXII PEATÜKK

VAHELDUVVOOLUMÄHISTE TÜÜBID JA NENDE OMADUSED

22-1. ÜLDISI ANDMEID

Vahelduvvoolumasinates kasutatakse mähistena kas ühesuguseid vahelduvvoolumähiseid nii staatoril kui ka rootoril (faasirootoriga asünkroonmasinad), või kasutatakse staatoril tavalisi vahelduvvoolumähiseid, kuid rootoril eritüüpi mähiseid (lühismähiseid — lühisrootoriga asünkroonmasinates, ergutusmähiseid — sünkroonmasinates).

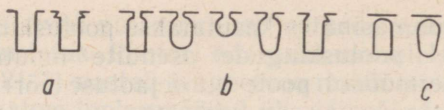
Käesolevas peatükis käsitleme ainult mõningaid vahelduvvoolumähiste tüüpe ja nende omadusi.

Vahelduvvoolumähise moodustavad kindla skeemi järgi ühendatud pooligrupid. Iga pool koosneb omakorda kas ühest või mitmest vaskkeerust. Tavaliselt valmistatakse ühekeerulised poolid suure ristlõikepinnaga ristkülikulistest vaskvarrastest ja niisuguseid mähiseid nimetatakse varrasmähisteks.

Mähise keerud isoleeritakse üksteisest keeruisolatsiooniga. Kõrgematele pingetele valmistatud mähiste poolid isoleeritakse omavahel. Kogu mähis isoleeritakse uurde metallseintest uurdeisolatsiooniga.

Mähise üksikud poolid asetsevad staatori- või rootoriplekkidesse stantsitud uuretes, mis kuju järgi jaotatakse: lahtisteks, poollahtisteks ja kinnisteks (joon. 22-1). Tänapäeval valmistatavates normaalsete vahelduvvoolumähistega vahelduvvoolumasinates kinniseid uurdeid peaaegu ei kasutata. Poollahtiseid uurdeid kasutatakse tavaliselt masinates pingetele kuni 550 V. Kõrgepingelistes masinates kasutatakse enamasti lahtisi uurdeid, mispuhul on võimalik mähist paremini staatori südamikust isoleerida.

Kui uurdesse on paigutatud ainult üks pooli külg, siis saame



a *b* *c*

Joon. 22-1. Uurete kuju:
a — lahtised; *b* — poollahtised; *c* — kinnised

ühekihilise mähise. Kui ühes uurdes asetseb ülestikku kaks pooli külge, siis niisugust mähist nimetatakse kahekihiliseks mähiseks.

Vahelduvvoolumähiseid iseloomustavad järgmised põhiandmed: uurete arv Z, pooluste arv $2p$, faasimähise paralleelharude arv a, faaside arv m, keerdude arv faasis w, faaside ühendusskeem (kolmefaasilise mähise $m = 3$ korral — täht- või kolmnurkühendus), mähise samm y, suhteline samm β, uurete arv pooluse ja faasi kohta $q = Z/2pm$.

Mähise graafiliseks kujutamiseks kasutatakse kõige sagedamini laotatud skeeme, mis saadakse staatori või rootori uuretega silindrilise pinna laotamisel tasapinnale (vt. joon. 22-14).

Mähise üksikud poolid, sõltumata keerdude arvust, kujutatakse ühe joonega. Kui uurdes asuvad ülestikku kaks pooli (kahekihiline mähis), siis kujutatakse pealmine pool jämeda joonega antud uurde järjekorranumbrist vasakul pool (vt. joon. 22-14, *a*).

Mähiseid võib liigitada:

1) mähiste tüüpide järgi — poolidest koosnevad mähised, varrasmähised, eritüüpi mähised (lühismähised, murdmähised jne.);

2) faaside arvu järgi — ühe- ja mitmefaasilised mähised;

3) valmistamisviisi järgi — käsitsi valmistatud, šabloon- või poolšabloonmähised;

4) poolide asetuse järgi uurdeis — ühekihilised ja kahekihilised mähised;

5) poolide kuju järgi — silmusmähised ja lainemähised;

6) laupühenduste paigutuse järgi — kahe- ja kolmekorruselised mähised;

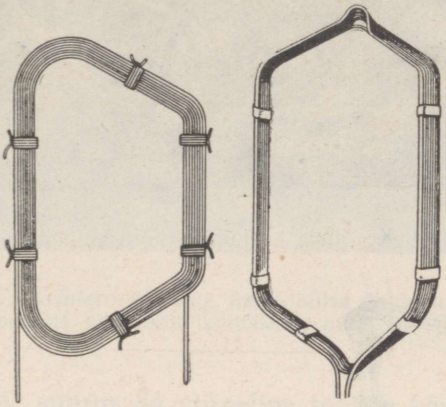
7) uurete arvu q järgi pooluse ja faasi kohta — mähised täisarvulise uurete arvuga ja murdarvulise uurete arvuga pooluse ja faasi kohta.

Kõige levinumad on pooluse ja faasi kohta täisarvulise uurete arvuga kahekihilised mähised, mida vaatlemegi esmajoones. Enne seda peatume lühidalt kolmefaasilise mähise koostiselementidel ja nende isolatsioonil.

22-2. VAHELDUVVOOLUMÄHISTE PÕHIELEMENTE

Vahelduvvoolumähised nagu alalisvoolu-ankrumähisedki koosnevad üksikutest keerdudest, mille moodustavad kaks järjestikku ühendatud uurdes asuvat juhet. Kaks juhet ühendatakse järjestikku uurdest väljaulatuvate osade — laupühenduste — abil.

Üksikutest keerdudest moodustatakse poolid. Poollahtiste uurete korral (joon. 22-1) kasutatakse painduvatest poolidest koostatud mähist. Painduvad poolid valmistatakse võimaluse korral šabloonil kerituina ümarvasktraadist ja nad omavad vastavalt otstarbele erinevat kuju (joon. 22-2). Niisuguse traatmähise paigutamine pool-



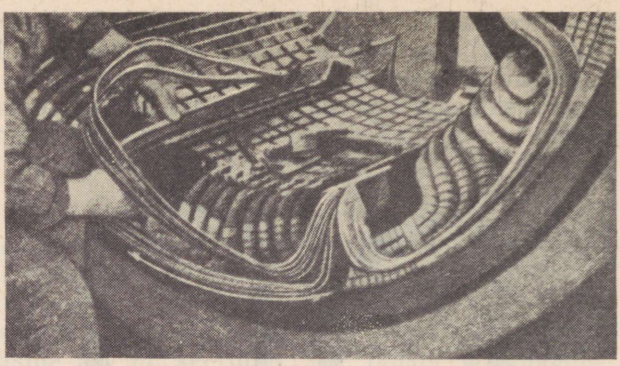
Joon. 22-2. Ühe- ja kahekihilistes mähistes kasutatavate pehmete poolide kuju

avatud uuretesse toimub üksikute keerdude poetamisega läbi uurde ava (joon. 22-3). Painduvatest poolidest koosnevat mähist kasutatakse tavaliselt pingetel kuni 550 V ja võimsustel kuni 100 kW.

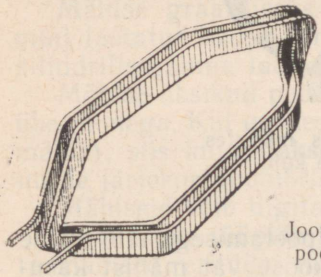
Masinates võimsusega 125 ... 400 kW ja pingega kuni 550 V kasutatakse poolavatud uurdeid, millesse asetatakse ristkülikulistest juhtmetest valmistatud poolid, kusjuures juhtmed asuvad kahes reas ja nad poetatakse uuretesse ridade kaupa. Mõnikord kasutatakse poollahtiste uurete puhul ka varem väljaspool masinat valmistatud ja isoleeritud nn. jäikpoolidest koosnevat mähist. Seejuures tehakse üks pool kahest osast koosnevana, nagu see on näidatud joonisel 22-4. Niisugune mähis asetatakse uuretesse varraste kaupa kindlas järjekorras, nagu see on näidatud joonisel 22-5. Mähise kaitsmiseks võimalike vigastuste eest asetatakse uurdesse õhuke, 0,2 mm paksune presspapp (joon. 22-5).

Suure võimsusega (üle 400 kW) ja kõrgepingeliste (tavaliselt 1000 ... 14 000 V) vahelduvvoolumasinate korral kasutatakse staatoris üksikutest jäikpoolidest (joon. 22-6) koosnevat kahekihilist mähist, mis asetatakse uuretesse juba valmis kujul (joon. 22-7).

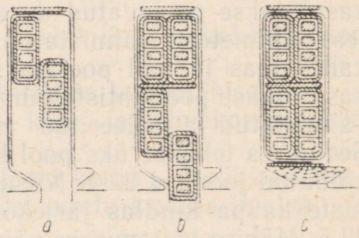
Staatori mähise valmistamisel üksikutest ristkülikulise ristlõikega vaskjuhtmetest on soovitav, et üksikud juhtmed asetseksid üksteise peal laiuti, s. o. ristlõike lühema teljega uurde kõrguse sihis. See on vajalik juhtmetes tekkivate pöörisvoolukadude vä-



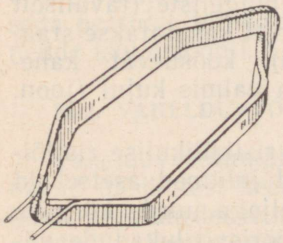
Joon. 22-3. Keerdude poetamine uurdesse läbi uurde ava



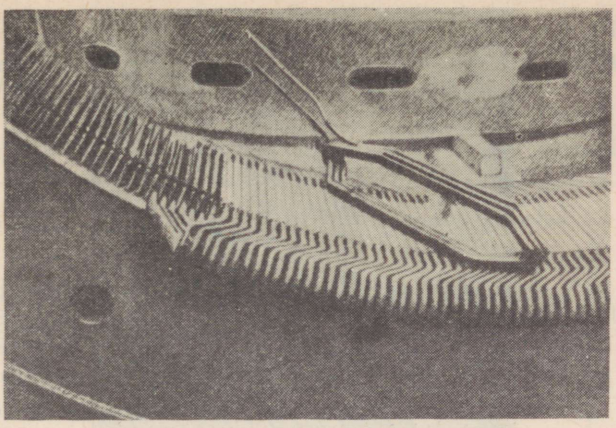
Joon. 22-4. Alajaotatud jäikpool poollahtiste uuretega staatorile



Joon. 22-5. Alajaotatud jäikpoolide asetamine poollahtistesse uuretesse



Joon. 22-6. Lahtistesse uuretesse asetatava kahekihilise mähise jäikpool

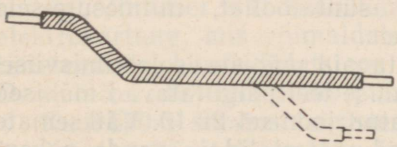


Joon. 22-7. Asünkroonmasina kahekihilise šabloonmähise poolide asetamine lahtistesse uuretesse

hendamiseks, mille suurus on võrdeline juhtme kõrguse neljanda astmega.

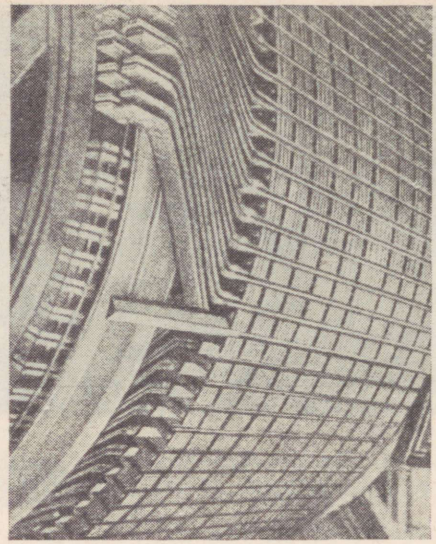
Faasirootoriga asünkroonmootorite rootori mähised asetatakse poolkinnistesse või lahtistesse uuretesse. Lahtisi, kuni 5 . . . 6 mm laiusi uurdeid kasutatakse viimasel ajal peamiselt kuni 100-kW masinates kahekihilise silmusmähise korral, mis valmistatakse ristkülikulise ristlõikega vaskjuhtmest ja mis koosneb üksikutest jäikpoolidest.

Üle 100-kW asünkroonmasinate faasirootorites kasutatakse peamiselt poolkinnisi paralleelseintega uurdeid, millesse asetatakse kahekihiline lainemähis. Niisugune lainemähis valmistatakse varrastest, mis omavad lõplikult kujundatud laupühenduse kuju ainult ühel pool (joon. 22-8). Niisugune isoleeritud varras asetatakse valmis kujul rootori poolkinnistesse uuretesse ja pärast seda



Joon. 22-8. Rootori lainemähise varras

antakse pooli teise otsa laupühendusele vastav kuju (joonisel 22-8 näidatud punktiiriga). Laupühendustes ühendatakse üksikud vardad kokku vaskklambritega ja jootmise teel (joon. 22-9).



Joon. 22-9. Asünkroonmasina rootori kahekihiline lainemähis nelja vardaga uurdes. Alumine kiht on kohale asetatud täielikult, ülemine osaliselt

22-3. MÄHISTE ISOLATSIOON

Normaalsete vahelduvvoolumasinate mähiste isolatsioonmaterjalidena kasutatakse A- ja B-klassi isoleermaterjale.

Juhtmematerjalina kasutatakse kas isoleeritud (ümarjuhtmed või väikese ristlõikega varrasjuhtmed) või paljasvaske (suure ristlõikega varrasjuhtmed).

Mähiste isolatsioonina kasutatakse tänapäeval väga mitmesuguseid materjale, nagu presspappi, lakkriiet, sünteetilisi kilesid, mikaniiti, mikafooliat, mikalinti, süntafooliat, mitmesuguseid immutus- ja kompaundeerimislakke.

Vaatleme siinkohal enamkasutatavaid mähiste isoleerimisviise.

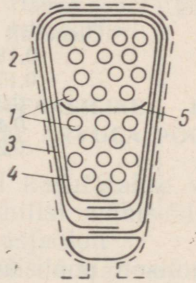
Poolkinnistesse uuretesse poetamise teel paigutatavad mähised isoleeritakse nii, nagu see on näidatud joonisel 22-10. Väiksemate masinate isoleerimiseks kasutatavad materjalid ja nende paksused on toodud tabelis 22-1.

Normaalmasinates (näit. seeria A ja AO 0,6 ... 100-kW asünkroonmasinates) kasutatakse staatori mähise juhtmena vaskjuhet ПЭЛБО läbimõõduga 0,59 ... 1,95 mm. Viimasel ajal minnakse üle juhtmematerjalile ПЭВ-2 ja ПЭЛР-2, mis võimaldavad tublisti suurendada uurde täitetegurit (näit. moderniseeritud asünkroonmasinate seeria A2 ja AO2).

Tabel 22-1

Poolkinnistesse uurdeisse paigutatud staatorimähise isolatsioon pingetele kuni 550 V

Positsiooni nr. joonisel 22-10	A-klassi isolatsioon		B-klassi isolatsioon	
	Materjali nimetus	Paksus mm	Materjali nimetus	Paksus mm
1	Juhtmematerjal: ПЭЛШО, ПЭЛБО, ПБД või ПЭВ	Olenevalt läbimõõdust	Juhtmematerjal: ПДА, ПСД või ПЭТСО	Olenevalt läbimõõdust
2	Presspapp ЭВ	0,1 ... 0,3	Presspapp ЭВ	0,1 ... 0,2
3	Lakksiid või lakkriie	0,06 ... 0,20	Painduv mikaniit või klaasriie	0,1 ... 0,3
4	Presspapp ЭВ või leteroid	0,3 ... 0,5	Presspapp või leteroid	0,1 ... 0,2
5	Presspapp ЭВ	0,1 ... 0,2	Presspapp	0,3 ... 0,5



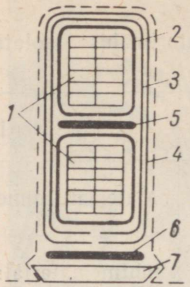
Joon. 22-10. Poolkinniste uuretega staatori mähise uurdeisolatsioon pingele kuni 550 V (tähiste seletus vt. tabel 22-1)

Staatori mähise uurdeisolatsioon on tavaliselt kolmekihiline, koosnedes kahest kihist presspapist ja nende vahel asuvast lakkriidest. Viimasel ajal leiab laialdast kasutamist kahekihiline kile-elektrokartong, mis võimaldab tunduvalt suurendada uurde vase täitetegurit. Uurdeisolatsioon masinaile staatori läbimõõduga $D_a = 145 \ldots 493$ mm omab paksust 0,35 ... 0,65 mm.

Kuni 550-V staatori lahtistesse uuretesse paigutatud mähise isolatsioonina kasutatakse A- või B-klassi materjale, kusjuures uurdeisolatsioonina kasutatakse ühte alltoodud konstruktsioonidest: 1) uurdekarpi, 2) pehmet hülssi, 3) kõva hülssi (mikafooliumist), 4) pidevat isolatsiooni (mikalindiga).

Joonisel 22-11 on toodud uurdekarbi konstruktsioon A-klassi isolatsiooni kasutamisel. Kasutatavad materjalid ja nende paksused on toodud tabelis 22-2.

Pehme või kõva hülsi kasutamise korral moodustatakse pooli

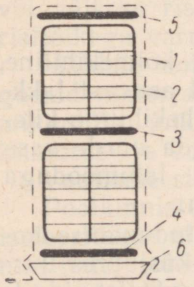


Joon. 22-11. Lahtiste uuretega staatori mähise *A*-klassi uurdeisolatsioon pingetele kuni 550 V (tähistused vt. tabel 22-2)

Tabel 22-2

Lahtistesse uuretesse asetatud staatorimähise isolatsioon pingetele kuni 550 V uurdekarbi kasutamise korral A klassi isoleermaterjalidest

Positsiooni nr. joonisel 22-11	Materjali nimetus	Paksus mm
1	Mähisetraat ПБД	Olenevalt läbimõõdust
2	Batist- või mikalint	0,18 . . . 0,2
3	Lakkriie	0,15 . . . 0,2
4	Presspapp ЭВ	0,2 . . . 0,5
5	Presspapp ЭВ	0,4 . . . 1,0
6	Sama	0,2 . . . 0,5
7	Linaõlis immutatud puitkiil või getinakskiil	



Joon. 22-12. Pideva uurdeisolatsiooniga staatorimähiste konstruktsioon pingetele 3000 . . . 11000 V (tähistused vt. tabel 23-3)

isolatsioon hülsitaoliselt pooli ümber keeratud lakkriidest või mikafooliumist, mis pealt on kaetud isoleerlindiga.

Poolide laupühendused isoleeritakse tavaliselt lakkriidega või mikalindiga, olenevalt isolatsiooniklassist, ning kaetakse pealt isoleerlindiga.

Pideva isolatsiooni korral isoleeritakse pooli uurde ja laupühenduste osa mikalindiga, mis mähitakse pidevalt poolile ülekattega poole lindi ulatuses. Väljaspool masinat isoleeritud poolid asetatakse juba valmis kujul uurdesse (joon. 22-12).

Lahtistesse uuretesse asetatavad staatorimähised pingetele 3000 . . . 11 000 V valmistatakse A- või B-klassi isoleermaterjaliga, kusjuures kasutatakse kaht põhilist konstruktsiooni:

a) pidevat isolatsiooni mikalindiga,
b) mikafooliumist valmistatud hülssi.

Joonisel 22-12 on toodud pideva isolatsiooniga staatorimähise konstruktsioon pingele 3000 ... 11 000 V. Kasutatavad materjalid ja nende paksused on toodud tabelis 22-3.

Tabel 22-3

Staatori mähise pidev isolatsioon pingetele 3000...11000 V

Positsiooni nr. joonisel 22-12	Materjali nimetus	Paksus mm
1	Keerdudevaheline isolatsioon	Olenevalt isolatsiooniklassist ja pingest
2	Poole ülekattega keritud mikalintmähis (0,1 ... 0,13 mm paksune), peal pidev taft- või asbestlint-mähis	Olenevalt pingest üldise paksusega 1,6 ... 3,1
3	Presspapp ЭВ või vahemikaniit	0,5 ... 1,5
4 ja 5	Presspapp ЭВ	0,5 ... 1,0
6	Kiil (tammepuust, getinaksist või tekstoliidist)	—

22-4. KOLMEFAASILISED KAHEKIHILISED MÄHISED TÄISARVULISE UURETE ARVUGA POOLUSE JA FAASI KOHTA

Tänapäeval kasutatakse vahelduvvoolumasinates kõige sagedamini kahekihilisi mähiseid. Nende laialdase leviku põhjusteks on järgmised asjaolud:

1) kahekihilised mähised võimaldavad valida niisugust mähise sammu, mille puhul kõrgemate harmooniliste mõju emj. ja mmj. kõverates viiakse miinimumini;

2) mähise sammu sobiva valimisega on võimalik tunduvalt vähendada vase ja isoleermaterjalide kulu laupühendustele;

3) kuna kahekihilise mähise kõik poolid on ühesugused, siis võimaldab see mähkimist suuremas ulatuses mehhaniseerida; ükskõik millise täisarvulise uurete arvu q puhul pooluse ja faasi kohta on maksimaalne võimalik mähise paralleelharude arv võrdne pooluste arvuga, sest kahekihiline mähis omab $2p$ täiesti ühesugust pooligruppi.

Kahekihilised vahelduvvoolumähised jagunevad omakorda silmus- ning lainemähisteks, mida käsitleme allpool eraldi.

Alalisvoolu-ankrumähisest kolmefaasilise kahekihilise mähise saamise põhimõte. Vahelduvvoolumasina saamise moodus alalisvoolumasinast on kujutatud joonisel 20-17 (vt. p. 20-4). Niisuguse masina faasimähised osutuvad ühendatuks kolmnurka, mistõttu kontaktrõngastelt saadav liinipinge on samal ajal ka faasipingeks. Selliseid vahelduvvoolumähiseid kasutatakse üheankru-

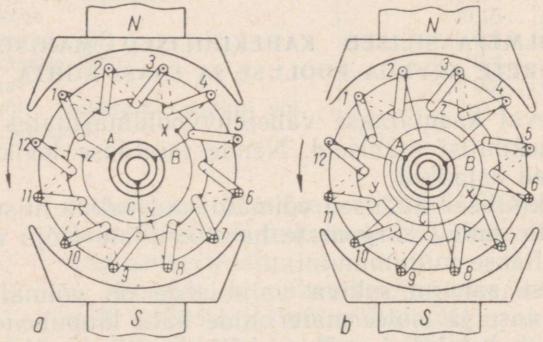
muundajate (vt. p. 41-1) ja vahelduvvoolu-kommutaatormasinate rootoritel (vt. p. 43-1).

Selleks et suurendada saadavat vahelduvvoolu pinget, võime suletud ankrumähise lõigata kolmest kohast lahti ja ühendada saadud osad tähte (joon. 22-13, *a*). Saame faasitsooniga 120° (elektrilist) kolmefaasilise kahekihilise mähise. Niisugune mähis on aga elektriliselt halvasti ära kasutatud, sest mähise jaotustegur omab kõigest väärtust

$$k_p = \frac{\sin \frac{4 \cdot 30°}{2}}{4 \sin \frac{30°}{2}} = 0{,}833,$$

sest antud mähise $q = 4$ ja $\alpha = \frac{360°}{12} = 30°$.

Mähise vase paremaks ärakasutamiseks jaotatakse suletud ankrumähis pooluspaari ulatuses kuude ossa ning ühendatakse kokku üheks faasiks vastasnimeliste pooluste all diametraalselt vastasseisvad alagrupid (joon. 22-13, *b*). Saame 60° faasitsooniga kol-



Joon. 22-13. Kahekihilise kolmefaasilise mähise saamine alalisvoolu-ankrumähisest tema jaotamisel kolme ossa (*a*) ja kuude ossa (*b*)

mefaasilise kahekihilise mähise. Antud juhul on mähisel $q = 2$ ja niisuguse mähise jaotustegur

$$k_p = \frac{\sin \frac{2 \cdot 30°}{2}}{2 \sin \frac{30°}{2}} = 0{,}966.$$

Seega on 60° faasitsooniga mähise elektriline ärakasutamine suurem 120° faasitsooniga mähisest 0,966/0,833 = 1,16 korda ehk

16%. Seepärast leiavad peamist kasutamist 60° tsooniga mähised, mida käsitlemegi allpool lähemalt.

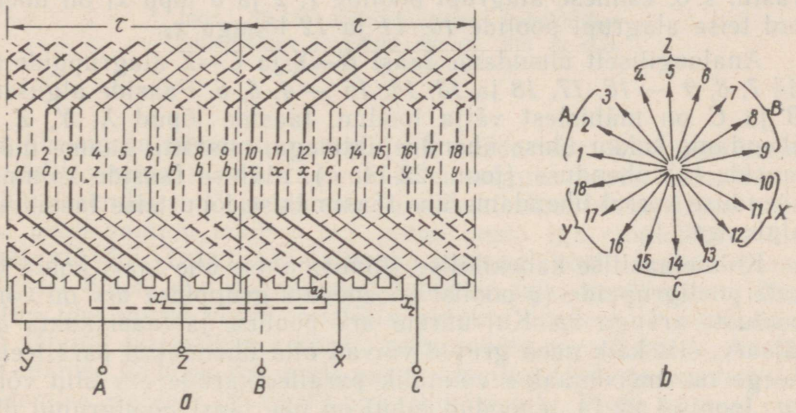
Kui asetame saadud mähise ilma midagi muutmata staatori uurdeisse, saamegi kolmefaasilise kahekihilise mähise põhimõtteskeemi.

Kahekihiline kolmefaasiline silmusmähis. Vaatame konkreetse näite abil kahekihilise kolmefaasilise silmusmähise moodustamist.

Koostame mähise skeemi andmetega: $m = 3$, $2p = 2$, $Z = 18$, $y = 7/9\ \tau$, kus

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{18}{2 \cdot 3} = 3 \text{ ja } \alpha = \frac{360°}{18} = 20°.$$

Koostame selle mähise jaoks uurde elektromotoorsete jõudude tähe (vt. p. 21-4), mis antud juhul koosneb 18 vektorist (iga vektori vaheline nurk $\alpha = 20°$) (joon. 22-14, *b*). Kuna kahekihilise



Joon. 22-14. Kolmefaasiline kahekihiline silmusmähis, kui $m = 3$; $2p = 2$; $q = 3$; $y = 7/9\tau$:
a — laotatud skeem; *b* — uurde elektromotoorsete jõudude täht

mähise puhul ühes uurdes asub kaks pooli külge, siis uurde elektromotoorsete jõudude täht vastab uurdes asuvate poolide ülemistele külgedele, s. o. pooli algustele. Pooli alumiste külgede (s. o. lõppude) asend on määratud mähise sammuga, mis kahekihiliste mähiste juures võib omada vabalt ette antud suurust (antud korral $y = 7/9\ \tau$ ehk 7 uurdejaotust).

Võttes arvesse kahekihilise mähise koostamise ülaltoodud põhimõtteid, jagame uurde elektromotoorsete jõudude tähe kuude ossa. Iga faasi kohta saame kaks poolide alagruppi, millest üks alagrupp (koosneb kolmest poolist) asub ühe pooluse all, teine alagrupp aga temale vastasseisva (vastasnimelise) pooluse all. Faasi *A* ühe alagrupi poolide algusteks valime uurded *1, 2* ja *3* ning

temale diametraalselt vastasseisva alagrupi *X* poolide algusteks uurded *10, 11* ja *12*. Faasi *B—Y* alagruppide algused peavad olema nihutatud faasi *A—X* alagrupi alguste suhtes 120° (elektrilist). Seega faasi *B—Y* alagruppide algused asuvad uuretes *7, 8, 9 (B)* ja *16, 17, 18 (Y)*. Analoogiliselt faasi *C—Z* alagruppide algused asuvad uuretes *13, 14, 15 (C)* ja *4, 5, 6 (Z)*.

Saadud uurde elektromotoorsete jõudude tähe põhjal asume mähise laotatud skeemi väljajoonestamisele (joon. 22-14, *a*). Mähise skeemi joonestamist alustame faasiga *A—X*. Joonestame jämeda joonega faasi *A—X* uurete pealmistes kihtides asuvad poolide küljed (*a* ja *x*), mis asuvad uuretes *1, 2, 3* ja *10, 11, 12*. Nende poolide teised küljed asuvad pooli sammu 7/9 τ (7 uuret) võrra nihutatud uurete *8, 9, 10* ja *17, 18, 1* alumistes kihtides. Üksikud poolid on kõik ühendatud järjestikku.

Faasi *A—X* kahe alagrupi poolid on ühendatud üksteisele vastu, s. o. esimese alagrupi poolide *1, 2* ja *3* lõpp x_1 on ühendatud teise alagrupi poolide *10, 11* ja *12* lõpuga x_2.

Analoogiliselt ühendame faasi *B—Y* ja *C—Z* alagruppide poolid *7, 8, 9 — 16, 17, 18* ja *13, 14, 15 — 4, 5, 6*. Faaside algused *A, B* ja *C* on mähistest välja toodud, faaside lõpud *X, Y, Z* aga ühendame kokku ühise ühendusjuhtmega, mistõttu saame mähise faaside tähtühenduse (joon. 22-14, *a*). Mähise faaside kolmnurkühenduse korral ühendame ühe faasimähise lõpu teise faasimähise algusega.

Kolmefaasilise kahekihilise silmusmähise ühe faasi kohta tulevate pooligruppide (*q* poolist koosnevate gruppide) arv on võrdne pooluste arvuga $2p$. Kui uurete arv pooluse ja faasi kohta *q* on täisarv, siis kõik need grupid võivad olla ühendatud paralleelselt. Seega on maksimaalne võimalik paralleelharude arv siin võrdne $2p$. Joonisel 22-14, *a* toodud juhul on ühe faasi pooligrupid ühendatud järjestikku, kuid vajaduse korral võiksime neid ühendada ka paralleelselt.

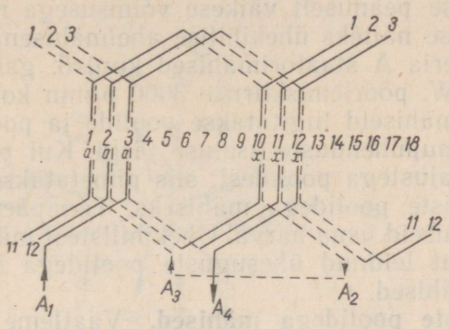
Kahekihiline kolmefaasiline lainemähis. Kahekihilisi lainemähiseid kasutatakse suure võimsusega vahelduvvoolumasinate korral, kus nad võimaldavad mähise vase kokkuhoidu faasi pooligruppide vaheliste ühenduste puudumise tõttu. Niisugune mähis valmistatakse tavaliselt varrasmähisena.

Asünkroonmasinates kasutatakse lainemähiseid põhiliselt faasirootoriga asünkroonmootorite rootorimähistena, mispuhul nad valmistatakse diametraalse sammuga. Selline mähis valmistatakse enamasti kahe või nelja vardaga uurdes (joon. 22-9).

Vaatame kahekihilise lainemähise skeemi juhul, kui $m = 3$, $2p = 2$, $Z = 18$ ja $y = \tau$.

Niisuguse mähise uurde elektromotoorsete jõudude täht on toodud joonisel 22-14, *b* ja mähise skeem joonisel 22-15. Ülevaatlikkuse mõttes on mähise ühendusskeem välja joonestatud vaid

faasi A—X jaoks. Faasi alguseks on valitud uure *3*. Diametraalse sammu puhul on uurdes *3* asuv ülemine varras ühendatud uurdes *12* asuva alumise vardaga. Järgmine mähise samm tuleb valida



Joon. 22-15. Kolmefaasilise kahekihilise lainemähise laotatud skeem, kui $m = 3$; $2p = 2$; $q = 3$; $y = \tau$

kas ühe uurde võrra suurem või ühe uurde võrra väiksem diametraalsest sammust, et antud mähis ei sulguks peale esimest ringkäiku iseendaga. Vajadus muuta kahekihilise lainemähise korral ühe pooli sammu tekib $p > 1$ puhul peale iga ringkäiku rootori ümbermõõdul. Tavaliselt valitakse viimase pooli samm diametraalsest lühem. Ka vaadeldaval juhul on teise pooli samm lühendatud ühe uurde võrra, mistõttu satume uurdest *12* uurdesse *2*. Nii läbime järjestikku rootori ümbermõõtu $q = 3$ korda, kusjuures mähise käik on paremalt vasakule, ning täidame uurdeis *1, 2, 3* ülemise, uurdeis *10, 11, 12* aga alumise kihi. Peale viimast ringkäiku peame lõppvardast A_2 üle minema vardasse A_3. Järgmise $q = 3$ ringkäigu ajal, mis toimub nüüd vasakult paremale, täidame sama faasi mähisega uurdeis *1, 2, 3* alumise ja uurdeis *10, 11, 12* ülemise kihi.

Analoogiliselt koostatakse ka faaside B—Y ja C—Z mähiseskeemid.

Nagu nähtub jooniselt 22-15, koosneb antud kahekihilise lainemähise iga faas kahest ühesugusest mähiseharust, mis antud juhul on ühendatud järjestikku.

22-5. KOLMEFAASILISED ÜHEKIHILISED MÄHISED TÄISARVULISE UURETE ARVUGA POOLUSE JA FAASI KOHTA

Ühekihilised mähised leiavad tänapäeval vähe kasutamist. Neid kasutatakse peamiselt väikese võimsusega masinate korral. Nii valmistatakse näiteks ühekihilise ahelmähisena asünkroonmasinate ühtlusseeria A staatorimähised kuni 5. gabariidini (võimsus 0,6 ... 10 kW, pöörlemiskiiruse 3000 p/min korral).

Ühekihilisi mähiseid liigitatakse poolide ja pooligruppide valmistusviisi ja laupühenduste asetuse järgi. Kui pooligrupp koosneb erinevate laiustega poolidest, siis nimetatakse niisugust mähist kontsentriliste poolidega mähiseks. Tänapäeval kasutatakse niisuguseid mähiseid üsna harva. Ühekihilistest mähistest on kõige suuremat levikut leidnud ühesuguste poolidega šabloonmähised, eriti aga ahelmähised.

Kontsentriliste poolidega mähised. Vaatleme kontsentriliste poolidega mähise moodustamist juhul, kui $m = 3$, $2p = 4$, $Z = 24$ ja $q = Z/2pm = 24/4 \cdot 3 = 2$. Naaberuurete vaheline nihkenurk elektrilistes kraadides $\alpha = \frac{p \cdot 360°}{Z} = \frac{2 \cdot 360°}{24} = 30°$. Sama nurga α võrra on nihutatud ka naaberuurdeis indutseeritud elektromotoorsete jõudude vektorid. Antud juhu jaoks saame uurde elektromotoorsete jõudude tähe joonestamisel kaks üksteisega kattuvat vektorite kimpu, millest kumbki koosneb 12 vektorist (joon. 22-16, *d*).

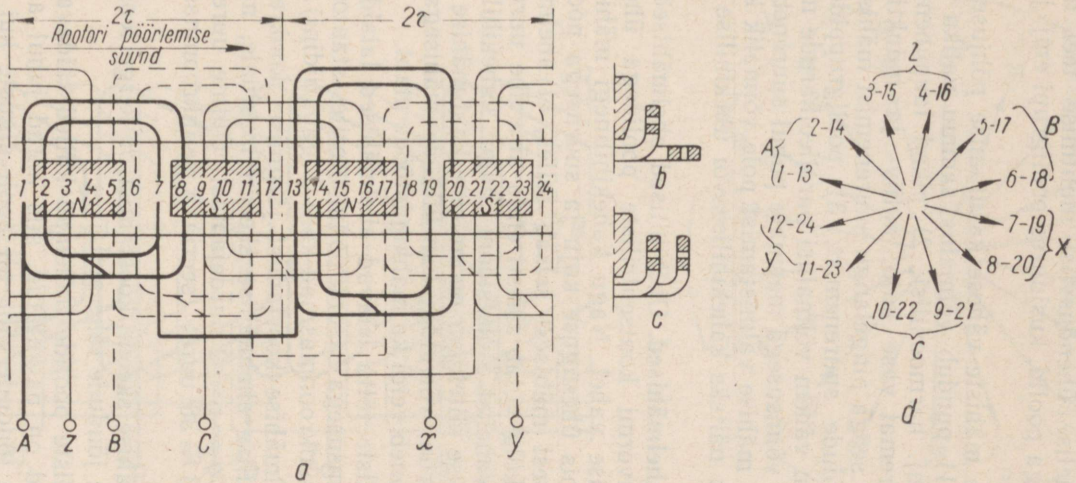
Võtame faasi *A*—*X* ühe pooluspaari all asuvate poolide algusteks uurded *1* ja *2* ning tähistame need tähega *A*. Nende poolide lõpud peavad asuma uuretes *7* ja *8*, mis on uurete *1* ja *2* suhtes 180° (elektrilist!) nihutatud. Uurded *7* ja *8* tähistame tähega *X*. Sama faasi teise pooluspaari all asuvad uurded *13, 14 (A)* ja *19, 20 (X)*. Seega moodustavad faasi *A*—*X* poolid, mis asuvad uurdeis *1, 2, 7, 8* ja *13, 14, 19, 20*.

Faasi *B*—*Y* mähis peab olema faasi *A*—*X* mähise suhtes nihutatud 120° (elektrilist) staatori ümbermõõdul, s. o. 4 uurde võrra ($4 \cdot 30° = 120°$). Seega moodustavad faasi *B*—*Y* uurded *5, 6, 11, 12* ja *17, 18, 23, 24*, mis on joonisel 22-16, *d* tähistatud tähtedega *B* ja *Y*.

Faasi *C*—*Z*, mis on faasist *B*—*Y* omakorda nihutatud 120° (elektrilist) moodustavad uurded *9, 10, 15, 16* ja *3, 4, 21, 22*, mis on tähistatud tähtedega *C* ja *Z*.

Saadud uurete jaotuse põhjal on üksikute faaside vahel võimalik koostada mähise laotatud skeemi. Mähise kujundamisel peab võtma arvesse, et kõik faasimähised peavad omama ühesugust aktiiv- ja induktiivtakistust ning et mähise poolide laupühendused võiksid üksteisest vabalt mööduda.

Nimetatud tingimuste rahuldamiseks tuleb iga faasimähis koostada kahest erinevast pooligrupist: üks väiksema laupühenduste pikkusega ja teised — pikemate laupühenduste pikkusega (joon. 22-16, *a*). Niisuguse mähise laupühendused asuvad üksteis-



Joon. 22-16. Kolmefaasiline ühekihiline kontsentriliste poolidega mähis juhul, kui $m = 3$; $2p = 4$; $q = 2$:

a — laotud skeem; *b* ja *c* — laupühenduste asetus; *d* — uurde elektromotoorsete jõudude täht

sest möödumiseks kahes eri tasapinnas (joon. 22-16, *b* ja *c*), mistõttu seda mähist nimetatakse tema laupühenduste kuju järgi kahekorruseliseks.

Vaadeldava mähise poolide keskmine samm on võrdne poolusejaotusega ja seega omab mähis täissammuga mähise omadusi, sest juhtmete omavahelise ühendusviisi muutmise teel on võimalik saada täissammuga poolid, kusjuures pooligrupi emj. jääb muutumatuks.

Kontsentriliste mähiste vähese kasutamise põhjuseks on järgmised asjaolud: 1) puudub võimalus sammu valiku teel vähendada emj. ja mmj. harmoonilisi; 2) pikad laupühenduste osad, mis tingivad suuremat vase kulu, aktiiv- ja induktiivtakistuste suurenemist ning seega pingelangu suurenemist mähises ja mähises tekkivate kadude suurenemist; 3) pooligruppide erinevate takistuste tõttu on vähem võimalusi paralleelharude moodustamiseks; 4) suurema võimsusega masinate puhul suureneb mähkimistööde maht ja 5) mähise valmistamist pole võimalik küllalt mehhaniseerida, nagu näiteks kahekihilise või ühekihilise ahelmähise korral.

Ühekihilised ahelmähised. Ühekihilised ahelmähised kujutavad endast üleminekuvormi kontsentriliste poolidega ühekihilise ja kahekihilise mähise vahel. Nagu kahekihilinegi mähis valmistatakse ka ahelmähis ühesuguse kuju ja suurusega poolidest. Erinevus kahekihilisest mähisest seisab selles, et ahelmähise pooli kumbki aktiivne külg võtab täiesti enda alla ühe uurde. Seetõttu pole siin kihtidevahelist isolatsiooni nagu kahekihilise mähise puhul, mistõttu vase täitetegur on suurem, kuid mähise poolide arv väheneb kaks korda, võrreldes kahekihilise mähisega. Viimase asjaolu tõttu väheneb veidi ka mähkimistööde maht.

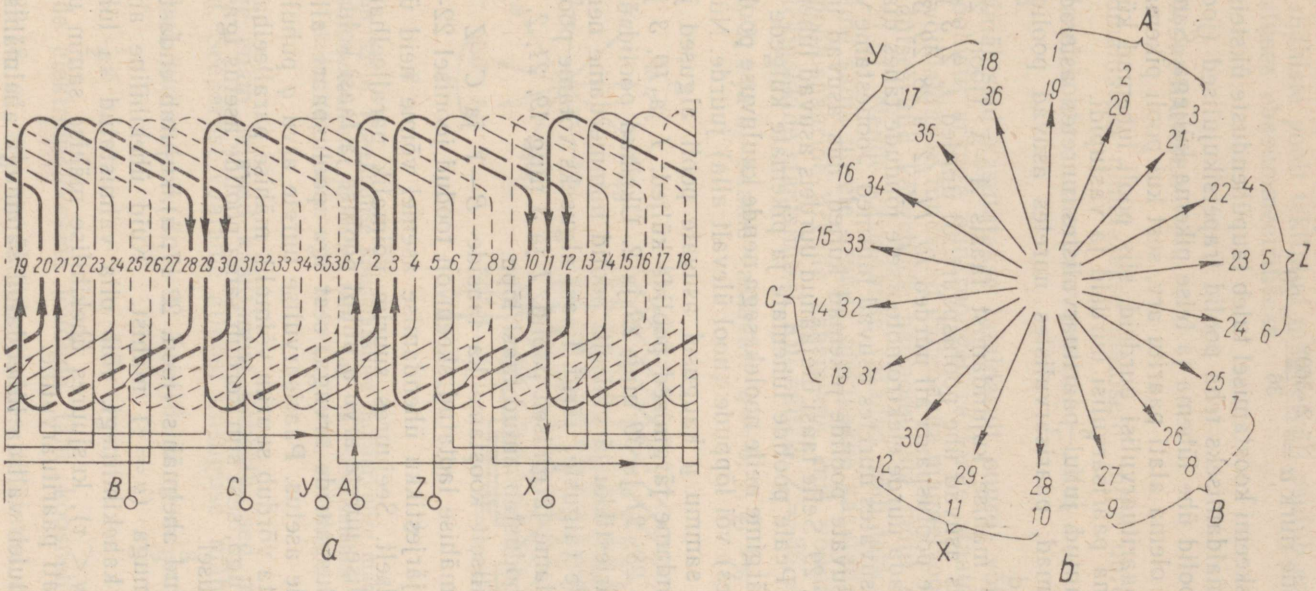
Nimetatud eeliste tõttu leiavad ahelmähised laialdast kasutamist väikese võimsusega asünkroonmootorite staatorimähistena (näit. seeria A asünkroonmasinad kuni 5. gabariidini).

Vaatleme ahelmähise koostamist järgmisel konkreetsel juhul. Koostame ühekihilise ahelmähise skeemi masinale, mille $m = 3$, $2p = 4$, $q = 3$ ja $y = \tau = 9$ uurdejaotust. Üldine uurete arv $Z = 2pmq = 4 \cdot 3 \cdot 3 = 36$ uuret (seeria A asünkroonmasinate 3., 4. ja 5. gabariit).

Ühekihilise mähise skeemi koostamist on kergé teostada uurde elektromotoorsete jõudude tähe abil.

Kuna ühekihiliste poolide mõlemad küljed täidavad täielikult uurded, kuhu nad on paigutatud, siis antud juhul annab uurde elektromotoorsete jõudude täht nii pooli alguste kui ka lõppude jagunemise üksikute faaside vahel, erinevalt kahekihilistest mähistest, kus nimetatud tähe alusel saame vaid pooli alguste jagunemise üksikute faaside vahel.

Ülalkirjeldatud mähise uurde elektromotoorsete jõudude täht



Joon. 22-17. Ühekihilise ahelmähise laotatud skeem, kui $m = 3$, $2p = 4$, $q = 3$, $y = \tau$ (*a*) ja uurde elektromotoorsete jõudude täht (*b*)

on toodud joonisel 22-17, *b*. See koosneb 18 uurde emj. vektorist, mille vaheline nurk $\alpha = \frac{2 \cdot 360°}{36} = 20°$.

Mähise skeemi koostamisel tuleb laupühenduste üksteisest möödumise võimaldamiseks teha poolid trapetsikujulised (joon. 22-2), seega on poolid ühe lühema ja teise pikema küljega. Samuti peab pooli samm olema alati paaritu arv, sest kui pooli pikemad küljed hõlmavad paarituarvulisi uurdeid, siis pooli lühemad küljed peavad hõlmama paarisarvulisi uurdeid ja vastupidi.

Teeme antud juhul paarituarvulistes uuretes asuvad poolide küljed pikemad, paarisarvulistes uuretes asuvad poolide küljed aga lühemad.

Vaatame mähise kujundamist faasis *A—X* (joon. 22-17, *a*). Antud faasis asuvad ühe pooluspaari all uurded *1, 2, 3* ja *19, 20, 21* ning teise pooluspaari all uurded *10, 11, 12* ja *28, 29, 30*. Kokku tuleb ühendada uurde elektromotoorsete jõudude tähes diametraalselt vastasasuvates uuretes asuvad juhtmed. Joonestame välja faasis *A—X* asuvate poolide pikemad küljed, mis asuvad uurdeis *1, 3, 11, 19, 21, 29*. Selle faasi ülejäänud uurdeis asuvad lühemad poolide küljed. Peale poolide lühemate ja pikemate külgede joonisele kandmist märgime neile noolekesega nende kuuluvuse pooli alguste (nool alt üles) või lõppude (nool ülevalt alla) juurde. Nüüd ühendame pooli sammu *y* kaugusel asuvate pooli algused ja lõpud. Selleks ühendame järgmised poolide küljed: *1* ja *10, 3* ja *12, 11* ja *20, 19* ja *28, 21* ja *30* ning *29* ja *2*. Üksikud poolid ühendame omavahel järjestikku järgmiselt: poolid nummerdame nende pikemate külgede (alguste) järgi. Faasi alguseks võtame pooli *1 (A)*. Edasi ühendame järgmised poolid: *1* ja *3* ning *19, 21, 2, 20* ja *11 (X)*, mis moodustab antud faasi lõpu.

Analoogiliselt koostame ka faaside *B—Y* ja *C—Z* mähised. Üldine ahelmähise laotatud skeem on toodud joonisel 22-17, *a*.

Poolide järjestikku ühendamise asemel võime neid ühendada ka paralleelselt. Seejuures suurim võimalik paralleelharude arv paarituarvulise uurete arvu *q* puhul pooluse ja faasi kohta võrdub mähise pooluspaaride arvuga, sest iga pooluspaari all kordub sama poolide asetus. Paarisarvulise uurete arvu *q* puhul pooluse ja faasi kohta võrdub suurim võimalik mähise paralleelharude arv pooluste arvuga, sest siin kordub sama poolide asetus iga poolusejaotuse ulatusel.

Kirjeldatud ahelmähis (joon. 22-17, *a*) kujutab endast diametraalse sammuga ($y = \tau$) mähist. Kuid ühekihiline ahelmähis, samuti kui kahekihilinegi, võib olla valmistatud ka lühendatud sammuga ($y < \tau$), kusjuures ühekihilise mähise samm uurdejaotustes on alati paarituarvuline.

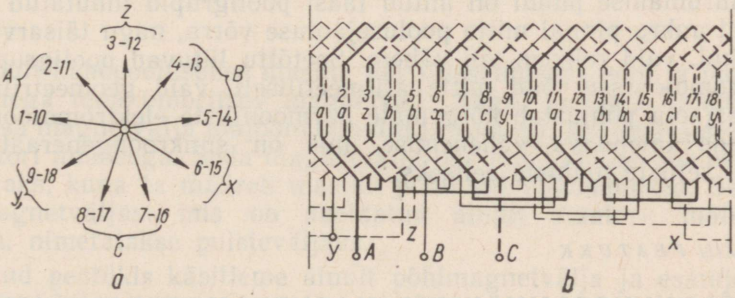
Üldiselt tuleb vältida lühendatud sammuga ahelmähiseid paa-

rituarvulise uurete arvu q puhul pooluse ja faasi kohta, sest niisuguste mähiste poolt tekitatud magnetväli osutub erinevate pooluste ulatuses ebasümmeetriliseks.

22-6. MURDMÄHISED

Murdmähisteks nimetatakse mähiseid, mille uurete arv pooluse ja faasi kohta on murdarv $q = a + \frac{b}{c}$, kus a — täisarv, $\frac{b}{c}$ — lihtmurd.

Murdmähiseid kasutatakse laialdaselt suure võimsusega ja suure pooluste arvuga sünkroongeneraatorite staatorimähistena, kus nad võimaldavad tunduvalt vähendada magnetvoo pulsatsiooni tõttu indutseeritud kõrgemate harmooniliste mõju emj. kõveras (vt. p. 21-6). Nende kasutamise vajadus võib tekkida ka juhul, kui tahame sama uurete arvuga plekipakke kasutada võimalikult suurte pooluspaaride arvude vahemikus, mis võimaldab kokkuhoidu plekipakkide stantsimisel. Kui näiteks $Z = 36$, siis juhul, kui $p = 1, 2, 3, 4$ ja 5, saame vastavalt $q = 6, 3, 2, 1\frac{1}{2}$ ja $1\frac{1}{5}$.



Joon. 22-18. Kahekihilise kolmefaasilise murdarvulise mähise uurde elektromotoorsete jõudude täht (a) ja silmusmähise laotatud skeem (b), kui $m = 3$, $2p = 4$, $Z = 18$, $q = 1^1/_2$, $y = {}^8/_9\tau$

Kõige enam leiavad kasutamist kahekihilised murdarvulised mähised. Seepärast vaatame allpool niisuguse mähise kujundamist juhul, kui $m = 3$, $2p = 4$, $Z = 18$ ja $y = \frac{8}{9}\tau$. Seega $q = \frac{18}{4 \cdot 3} = 1\frac{1}{2}$.

Uurde elektromotoorsete jõudude täht koosneb 9 vektorist (joon. 22-18, a), mis on üksteise suhtes nihutatud $\alpha = \frac{2 \cdot 360°}{18} =$

$= 40°$. Jaotame uurded üksikute faaside vahel nii, nagu see on näidatud joonisel 22-18, *a*.

Selleks et koostada mähise skeemi, on vaja valida mähise samm. Kuna poolusejaotusele vastab antud korral $\frac{18}{4} = 4{,}5$ uurdejaotust, siis teeme mähise lühendatud sammuga, võttes $y = 4$ uurdejaotust $\left(\beta = \frac{4}{4{,}5} = \frac{8}{9}\right)$.

Faasis *A*—*X* tuleb ühe pooluspaari kohta kaks poolide alagruppi. Esimese alagrupi poolide *1* ja *2* algustele vastavad uurde elektromotoorsete jõudude tähes vektorid, mis on tähistatud tähega *A*. Sama pooluspaari all asuva teise alagrupi pooli *6* algusele vastab elektromotoorsete jõudude tähes vektor, mis on tähistatud tähega *X*. Mõlemad poolide alagrupid ühendame teineteisele vastu. Samuti ühendame teise pooluspaari all olevad poolide alagrupid *10, 11* ja *15* üksteisele vastu. Erinevate pooluspaaride all olevad poolide grupid *1, 2, 6* ja *10, 11, 15* ühendame omavahel järjestikku. Vajaduse korral võime poolide grupid *1, 2, 6* ja *10, 11, 15* ühendada paralleelselt.

Analoogiliselt ühendame faasi *B*—*Y* poolide grupid *4, 5, 9* ja *13, 14, 18* ja faasi *C*—*Z* poolide grupid *7, 8, 12* ja *16, 17, 3*.

Kogu mähise skeem on toodud joonisel 22-18, *b*.

Murdmähise puhul on antud faasi pooligrupid nihutatud üksteisest ankru pinnal mitte poolusejaotuse võrra, nagu täisarvulise *q* puhul, vaid rohkem või vähem. Seetõttu liituvad pooligruppide elektromotoorsed jõud mitte aritmeetiliselt, vaid geomeetriliselt. See asjaolu põhjustab kõrgemate harmooniliste elektromotoorsete jõudude täiendava vähenemise, mis on sünkroongeneraatorite puhul selliste mähiste eeliseks.

XXIII PEATÜKK

VAHELDUVVOOLUMÄHISTE MAGNETOMOTOORNE JÕUD

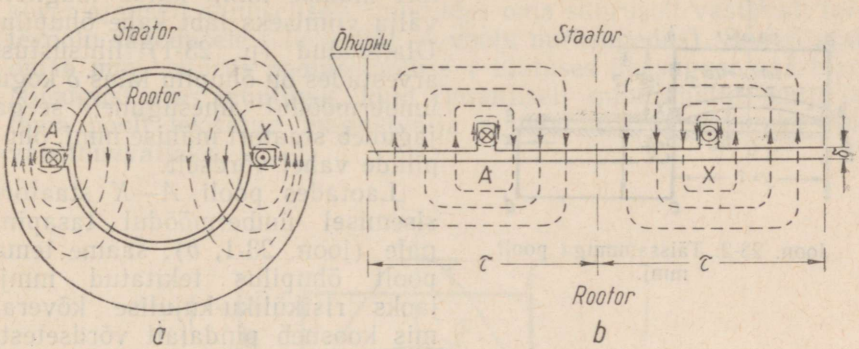
23-1. STAATORI MÄHISE MAGNETOMOTOORNE JÕUD JA TEMA POOLT TEKITATUD MAGNETVÄLI

Vool, läbides elektrimasina staatori ja rootori mähist, tekitab selle ümber magnetvälja. Tekkiv magnetväli oleneb mitte üksnes mähise liigist ja juhtmete jaotusest masina õhupilu ümbermõõdul, vaid ka magnetahela omadustest, mida mööda kulgeb magnetvoog. Seose mähist läbiva voolu ja magnetvälja vahel annab koguvoolu seadus, mis üldkujul, kui magnetahel koosneb *n* osast, on järgmine:

$$wi = \sum_{k=1}^{n} H_k l_k,$$

kus wi — vaadeldava suletud kontuuri poolt haaratav koguvool;
H_k — magnetvälja tugevus vaadeldavas magnetahela osas k;
l_k — magnetvoo toru pikkus antud magnetahela osas.

Vaatleme üldist magnetvälja ja teda esilekutsuva mmj. jagunemist juhul, kui on ergutatud ainult staatori mähis. Esialgu vaatleme mitmefaasilise mähise üht faasi, millel iga pooluspaari kohta on üks täissammuga pool. Joonisel 23-1 on lihtsuse mõttes näida-



Joon. 23-1. Kahepooluselise masina täissammuga pooli poolt tekitatud magnetvälja skemaatiline kujutis

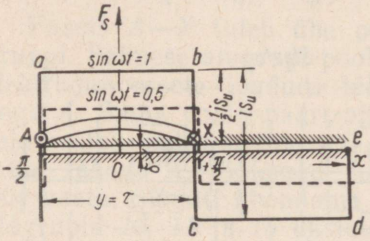
tud ainult kahepooluselise masina üks täissammuga pool ja punktiirjoonega teda ümbritsev magnetväli. Nagu jooniselt nähtub, läbib osa magnetvälja jõujooni õhupilu ja rootorit, aheldudes seega ka rootori mähisega. Seda magnetvälja osa nimetatakse põhimagnetväljaks, kuna ta määrab masina põhilised tööomadused. Seda osa magnetväljast, mis on aheldatud ainult staatori mähise endaga, nimetatakse puisteväljaks.

Antud peatükis käsitleme ainult põhimagnetvälja ja esmajoones teda tekitavat magnetomotoorset jõudu.

Vahelduvvoolumähise mmj. uurimise lihtsustamiseks oletame esialgu, et 1) staatori ja rootori südamike magnetiline läbitavus on lõpmata suur ($\mu = \infty$), s. o. antud magnetahela osad ei avalda magnetvoole mingit takistust, 2) masina massiivne rootor on täiesti sile ja 3) staatori mähis on paigutatud staatori ümbermõõdul ülikitsastesse uuretesse.

Vajalikke korrektiive, mis võtavad arvesse tegelikke magnetvälja tekkimise tingimusi (magnetahela mõju, magnetahela küllastuse mõju ja uurde avade mõju), on võimalik arvestada täiendavalt.

Vaatleme täissammuga pooli $A—X$ poolt tekitatud magnetvälja (joon. 23-1) pilti juhul, kui staatori mähise enese ümber puudub puisteväli. Nagu selgub jooniselt 23-1, läbib staatori mmj. poolt tekitatud magnetvoog kaks korda õhupilu ning staatori ja rootori südamiku. Kuna viimaste magnetilise takistuse loeme lõpmata väikeseks, siis kogu staatori mähise mmj. kulub magnetvälja viimiseks läbi kahe õhupilu. Ülaltoodud (p. 23-1) lihtsustusi arvestades on õhupilu laius δ kogu ümbermõõdul ühesugune, seega jaguneb staatori mähise mmj. õhupilude vahel võrdselt.



Joon. 23-2. Täissammuga pooli mmj.

Laotades pooli $A—X$ staatori sisemisel ümbermõõdul tasapinnale (joon. 23-1, *b*), saame tema poolt õhupilus tekitatud mmj. jaoks ristküliku-kujulise kõvera, mis koosneb pindalalt võrdsetest, kuid vastassuunalistest ristkülikutest $AaXb$ ja $Xedc$ (joon. 23-2).

Kui pool koosneb s_u keerust ja teda läbib siinuseline vool $i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$, siis voolu poolt tekitatud kogu pooli mmj. hetkväärtus on võrdne $is_u = \sqrt{2} Is_u \sin \omega t$. See pooli poolt tekitatud mmj. is_u tekitab õhupilus laiusega 2δ magnetvälja tugevusega H. Seega koguvoolu seaduse põhjal

$$2\delta H = is_u,$$

millest õhupilu väljatugevus

$$H = \frac{is_u}{2\delta}.$$

Õhupilu magnetiline induktsioon avaldub järgmiselt:

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot \frac{is_u}{2} = \lambda_\delta F_s, \qquad (23\text{-}1)$$

kus $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m — õhupilu magnetiline läbitavus,

$\lambda_\delta = \frac{\mu_0}{\delta}$ — õhupilu magnetiline erijuhtivus,

$F_s = \frac{is_u}{2}$ — pooli mmj., mis joonisel 23-2 kujutab ristküliku kõrgust Aa.

Seejuures

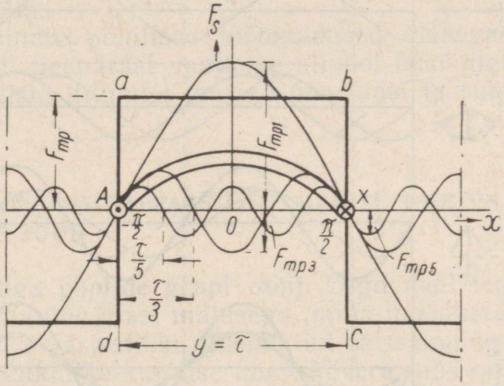
$$F_s = \frac{\sqrt{2}}{2} Is_u \sin \omega t = F_{sm} \sin \omega t,$$

kus

$$F_{sm} = \frac{\sqrt{2}}{2} I s_u \qquad (23\text{-}2)$$

kujutab pooli mmj. maksimaalset väärtust (hetkel $\sin \omega t = 1$).

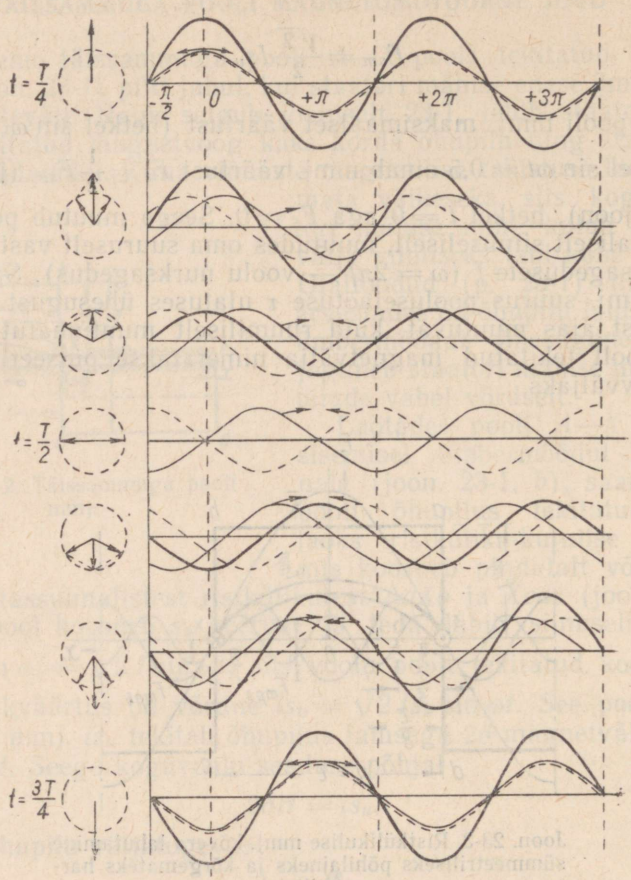
Hetkel $\sin \omega t = 0{,}5$ omab mmj. väärtust $F_s = \frac{1}{2} F_{sm}$ (joon. 23-2, punktiirjoon), hetkel $t = 0$ aga $F_s = 0$. Seega muutub pooli mmj. kõver ajaliselt siinuseliselt, muutudes oma suuruselt vastavalt toitevoolu sagedusele f ($\omega = 2\pi f$ — voolu nurksagedus). Samal ajal omab mmj. suurus poolusejaotuse τ ulatuses ühesugust väärtust. Niisugust ajas muutuvat, kuid ruumiliselt muutumatut mmj. ja tema poolt tekitatud magnetvälja nimetatakse pulseerivaks ehk vahelduvväljaks.



Joon. 23-3. Ristkülikulise mmj. kõvera lahutamine sümmeetriliseks põhilaineks ja kõrgemateks harmoonilisteks

Ristkülikukujulise mmj. kõvera (joon. 23-2) võime nagu väljakõveragi (p. 21-2, joon. 21-2) lahutada siinuseliseks põhilaineks ja kõrgemateks harmoonilisteks (joon. 23-3). Vaatleme olukorda hetkel $\sin \omega t = 1$. Siis avaldub mmj. kõvera maksimaalse väärtus seosega (23-2).

Ristküliku-kujuline mmj. kõver sisaldab põhiharmoonilist ($\nu = 1$) ja paarituarvulisi harmoonilisi ($\nu = 3, 5, 7, \ldots$). Seejuures põhiharmoonilise muutumise periood on võrdne ristküliku-kujulise mmj. kõvera muutumise perioodiga, kuna kõrgemate harmooniliste muutumise periood väheneb võrdeliselt harmoonilise järguga. Näiteks kolmanda harmoonilise muutumise periood on võrdne $\frac{1}{3}$ põhiharmoonilise muutumise perioodiga (vt. joon. 23-3).



Joon. 23-4. Vahelduvvälja lahutamine kaheks vastassuunas pöörlevaks pöördväljaks poole amplituudiga

Magnetomotoorse jõu põhiharmoonilise ($\nu = 1$) amplituudi jaoks on matemaatiliselt võimalik tuletada seost

$$F_{sm1} = \frac{4}{\pi} F_{sm} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} Is_u, \qquad (23\text{-}3)$$

s. o. pooli mmj. põhiharmoonilise amplituud on suurem ristkülikukujulise mmj. kõvera amplituudist $\frac{4}{\pi} = 1{,}27$ korda (s. o. 27%).

Kui põhiharmoonilise amplituudiks lugeda 100%, siis ristkülikukujulise mmj. kõvera kolmanda harmoonilise amplituud moodustab 33,3%, viienda harmoonilise amplituud — 20%, seitsmenda harmoonilise amplituud — 14,3% jne.

Kuna kõik mmj. harmoonilised annavad summas ristküliku-kujulise mmj. kõvera, siis muutuvad nad ajaliselt ühesuguse sagedusega, mille määrab pooli läbiva voolu sagedus.

Seega ühe pooli ristküliku-kujuline mmj. kõver koosneb ajaliselt ühesuguse muutumisperioodiga, s. o. pulseerivatest ruumiharmoonilistest.

Siinkohal märgime täiendavalt, et iga pulseerivat mmj. kõverat võib alati lahutada kaheks vastassuunas pöörlevaks poole amplituudiga pöördväljaks. See selgub graafiliselt joonisest 23-4. Meile soovitavas suunas liikuvat pöördvälja nimetatakse päriväljaks, vastassuunas liikuvat — vastuväljaks.

Mmj. kõvera harmoonilised võivad masina tööle avaldada tunduvat mõju. Nende segav mõju võib eriti avalduda väikese õhupiluga asünkroonmasinate puhul, kus nad tekitavad kahjulikke lisamomente, lisakadusid masina terassüdamikes ja mähistes, raadiohäireid jm.

Elektrimasinate põhilised tööomadused olenevad mmj. põhiharmoonilisest. Seepärast vaatleme allpool üksikute poolide mmj. põhiharmooniliste liitumist masina ühe faasi ja summaarse mmj. moodustamisel.

23-3. JAOTATUD MITMEFAASILISE MÄHISE ÜHE FAASI MAGNETOMOTOORNE JÕUD

Täissammuga poolide grupi mmj. Olgu meil tegemist mitmefaasilise masina ühe faasi mähisega, mida moodustavad pooligrupid koosnevad q järjestikku ühendatud täissammuga poolist. Iga pool tekitab ristküliku-kujulise mmj. kõvera, mis on üksteise suhtes nihutatud nurga $\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z}$ võrra. Kui me vaatleme iga pooli põhiharmoonilist, siis saame q siinuskõverat, mis on nihutatud staatori ümbermõõdul nurga α võrra. Siinuseliselt ruumis jaotatud mmj. kõverat võime kujutada vektorina, samuti nagu siinuseliselt ajas muutuvat voolu või elektromotoorset jõudu. Vektori suurus võrdub mmj. põhiharmoonilise amplituudiga, suund aga ühtib pooli teljega. Seega saame üldjuhul q nurga α võrra üksteisest nihutatut vektorit. Resulteeriva mmj. amplituudi saame üksikute vektorite geomeetrilisel liitmisel, samuti nagu ühe pooligrupi resulteeriva emj. määramisel (vt. p. 21-5). Siit järeldub, et q pooli resulteeriva mmj. põhiharmoonilise amplituud F_{mq1} ületab ühe pooli mmj. põhiharmoonilise amplituudi F_{sm1} qk_p korda, kus k_p — jaotustegur, mis on leitav valemi (21-13) järgi.

Seega leiame täissammuga poolide grupi mmj. amplituudi järgmisest seosest:

$$F_{mq1} = qk_pF_{sm1} = \frac{4}{\pi} qk_pF_{sm} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} qk_pS_uI. \qquad (23\text{-}4)$$

Mähise ühe faasi mmj. Ühekihilise diametraalse sammuga mähise puhul tuleb ühe faasi kohta p poolide gruppi. Kui kõik poolid ühendatakse järjestikku, on järjestikku ühendatud keerdude arv faasis

$$w = pqs_u.$$

Asendades avaldises (23-4) korrutise qs_u avaldisega $\frac{w}{p}$ (sest $w = pqs_u$), saame ühekihilise täissammuga mähise mmj. põhiharmoonilise amplituudi

$$F_{fp1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{wk_p}{p} I = 0{,}9 \frac{wk_p}{p} I. \qquad (23\text{-}5)$$

Olgu märgitud, et mähise mmj. väärtuseks loeme tema suurust ühe pooluse või ühe õhupilu kohta.

Kuna faasi resulteeriva mmj. amplituudi saame üksikute poolide mmj. põhiharmooniliste amplituudide liitmise teel, siis lühendatud sammuga kahekihilise mähise puhul saame faasi mmj. jaoks (23-5) analoogilise valemi, kus ainult mähise jaotustegur k_p tuleb asendada mähiseteguriga $k_w = k_p k_y$ nagu ühe faasi resulteeriva emj. puhulgi (21-16).

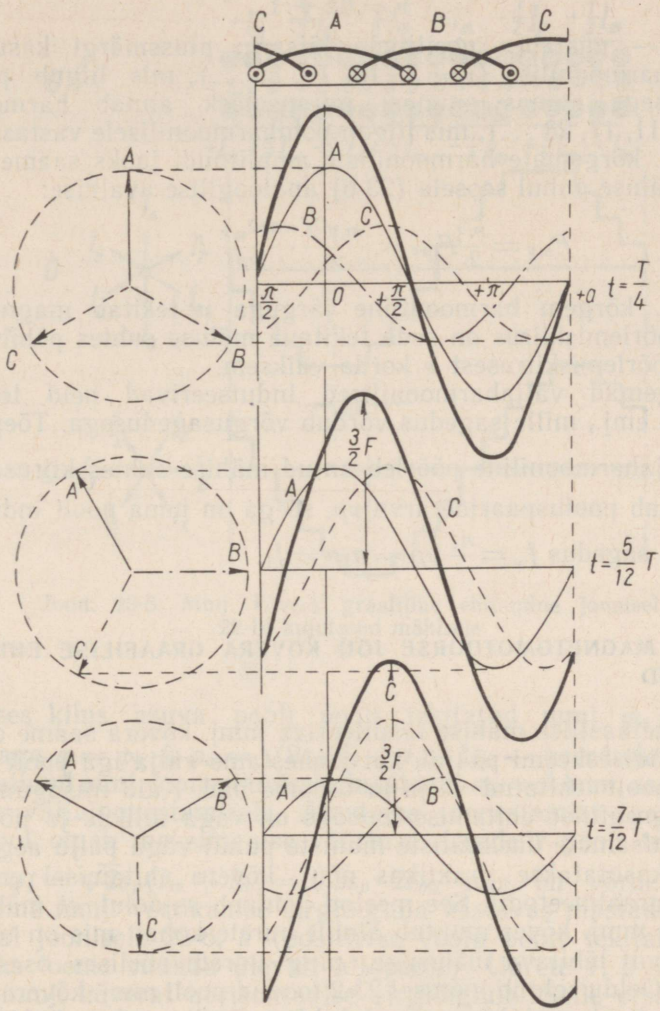
23-4. KOLMEFAASILISE MÄHISE MAGNETOMOTOORNE JÕUD

Kolmefaasilise vahelduvvoolumasina staatoris asub kolm faasimähist, mis on nihutatud staatori ümbermõõdul 120 elektrilise kraadi võrra. Sümmeetrilise koormuse korral on kõigis kolmes faasis suuruselt võrdsed, kuid ajaliselt 120° nurga võrra nihutatud voolud. Seega on kolmefaasilise mähise korral meil tegemist kolme pulseeriva mmj. kõveraga, mis on üksteise suhtes nihutatud nii ajaliselt kui ka ruumiliselt 120° võrra.

Vaatleme lihtsamat juhtu, kui iga faasi mähis koosneb ühest poolist pooluse kohta ($q = 1$) (joon. 23-5). Üksikute faaside poolt tekitatud mmj. põhiharmoonilised liituvad, tekitades resulteeriva mmj. kõvera. Joonisel 23-5 on toodud kolmefaasilise mähise $q = 1$ mmj. põhiharmoonilise kõverad kolme erineva hetke kohta. Jooniselt selgub, et resulteeriva mmj. kõvera põhiharmooniline on suurem ühe faasi mmj. põhiharmoonilisest suuruse $\frac{3}{2}$ võrra. Seega on m-faasilise masina resulteeriva mmj. põhiharmoonilise amplituud ühe pooluse kohta

$$F_1 = \frac{m}{2} F_{fp1} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{wk_w}{p} I. \qquad (23\text{-}6)$$

Samalt jooniselt selgub ka, et resulteeriva mmj. kõvera kesktelg ühtib selle faasi teljega, milles vool antud hetkel omab maksimaalse väärtuse. Jooniselt 23-5 näeme, et mmj. kõver liigub



Joon. 23-5. Pöördvälja tekitamine kolme pulseeriva välja abil

staatori ümbermõõdul sama nurkkiirusega $\omega = 2\pi f$, millega muutub ajaliselt ka vool.

Siiani vaatlesime mmj. põhiharmooniliste koosmõju. Toimides analoogiliselt eelnevaga kõigi mmj. kõvera harmooniliste suhtes, on võimalik näidata, et resulteeriva mmj. kõveras puuduvad kolmandad ja temaga kordsed harmoonilised. Resulteeriva mmj. kõver koosneb pöörlevaist paarituarvulistest harmoonilistest, mille järjekorranumber on leitav seosest

$$\nu = 6k \pm 1,$$

kus k — mistahes positiivne täisarv; plussmärgi kasutamine annab harmoonilise ($\nu = 7, 13, 19, 25 \ldots$), mis liigub põhiharmoonilisega samas suunas; miinusmärk annab harmoonilise ($\nu = 5, 11, 17, 23 \ldots$), mis liigub põhiharmoonilisele vastassuunas.

Mmj. kõrgemate harmooniliste amplituudi jaoks saame m-faasilise mähise puhul seosele (23-6) analoogilise avaldise:

$$F_{m\nu} = \frac{m}{2} F_{fp\nu} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{wk_{w\nu}}{\nu p} I. \qquad (23\text{-}7)$$

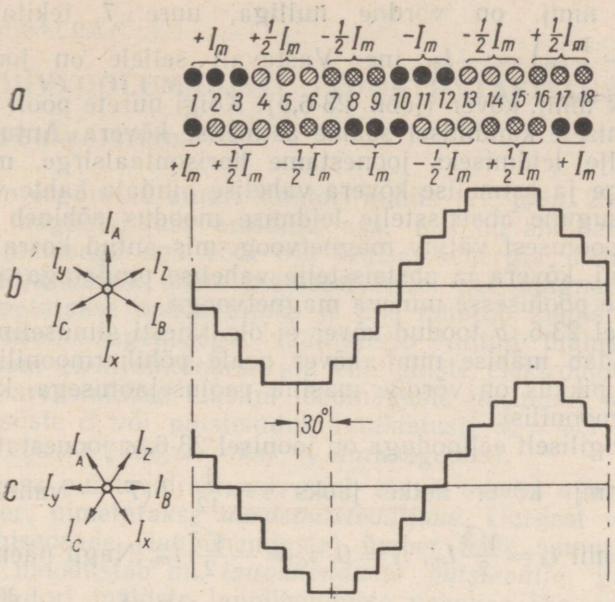
Mmj. kõrgem harmooniline järguga ν tekitab magnetvälja, mille pöörlemiskiirus on seda tekitava mähise suhtes põhiharmoonilise pöörlemiskiirusest ν korda väiksem.

Kõrgemad väljaharmoonilised indutseerivad neid tekitavas mähises emj., mille sagedus võrdub võrgusagedusega. Tõepoolest, ν-es väljaharmooniline pöörleb antud mähise suhtes kiirusega $\frac{n_1}{\nu}$, kuid omab pooluspaaride arvu νp, seega on tema poolt indutseeritud emj. sagedus $f_\nu = \frac{n_1}{\nu} \nu p = n_1 p = f_1$.

23-5. MAGNETOMOTOORSE JÕU KÕVERA GRAAFILISE EHITAMISE VIISID

Mitmefaasilise mähise resulteeriva mmj. kõvera saame olemasoleva mähiseskeemi põhjal, kui joonestame välja iga pooli (pooligrupi) poolt tekitatud välja ja liidame nad. Kuid niisugune mmj. kõvera graafilise ehitamise moodus on väga tülikas ja nõuab ka kõige lihtsamate ühekihiliste mähiste puhul väga palju aega. Seepärast kasutatakse praktikas mmj. kõvera ehitamisel enamasti nn. integraalmeetodit. See meetod põhineb asjaolul, et mähise resulteeriv mmj. kõver muutub ainult uurete kohal, mis on täidetud voolu poolt läbitava mähisega, ning uuretevahelises osas muutumatu. Õeldu selgub joonisel 23-2 toodud pooli mmj. kõverast, millest selgub, et mmj. kõver muutub hüppeliselt uurde kohal. Seejuures astme suurus on võrdne uurde koguvooluga is_u.

Vaatame allpool konkreetse näite varal mmj. kõvera graafilist ehitamist integraalmeetodil. Selleks võtame mähise, mis on toodud joonisel 22-14. Selle mähise poolide asetuse skeem on toodud joonisel 23-6, *a*. Märgime mähise skeemile (joon. 23-6, *a*) voolude väärtused faasimähistes hetkel, mil vool omab maksimaalse väärtuse faasis A ($i_a = I_m$, $i_b = -\frac{1}{2} I_m$, $i_c = -\frac{1}{2} I_m$). Igas uurdes asuva mähise poolt tekitatud resulteeriv mmj. on võrdne uurde ülemises kihis asuva pooli poolt tekitatud mmj. $\varphi_u = \sqrt{2} s_p I_u$ ja uurde



Joon. 23-6. Mmj. kõvera graafiline ehitamine joonisel 22-14 kujutatud mähisele

alumises kihis asuva pooli poolt tekitatud mmj. $\varphi_a = \sqrt{2} s_p I_a$ summaga $\varphi = \varphi_{\ddot{u}} + \varphi_a = \sqrt{2} s_p (I_{\ddot{u}} + I_a)$ (s_p — keerdude arv poolis). Valinud mmj. joonestamiseks mastaabi m_F = A/mm, asume mmj. kõvera väljajoonestamisele. Alustame joonestamist faasist *A-X*, kus vool omab maksimaalse väärtuse. Uurde *1* poolt tekitatakse mmj. $\varphi_1 = \sqrt{2} s_p (I_m + I_m) = \sqrt{2} s_p \cdot 2 I_m$, mis on võrdeline $2 I_m$. Kanname mmj. vertikaalse sirglõiguna vastavas mastaabis uurde *1* kohal joonisele 23-6, *b* (positiivse voolu poolt tekitatud mmj. suunaks loeme suunda ülevalt allapoole). Uurete *1*, *2* vahel jätkame mmj. kõverat horisontaalse sirglõiguna. Selle otsast uurde *2* kohalt kanname alla vertikaalse sirglõigu, mis vastab antud uurde poolt tekitatud mmj. suurusele $\varphi_2 = \sqrt{2} s_p (I_m + \frac{1}{2} I_m) =$ $= \sqrt{2} s_p \cdot \frac{3}{2} I_m$. Analoogiliselt eeltoodule jätkame mmj. kõvera joonestamist, kusjuures positiivse voolu poolt tekitatud mmj. kanname vastavas mastaabis sirglõiguna ülevalt allapoole, negatiivse voolu poolt tekitatud mmj. aga vastassuunas. Nagu näeme jooniselt 23-6, *a*, tekitavad uurded 2 ja 3 mmj., mis on võrdeline $I_m + \frac{1}{2} I_m = \frac{3}{2} I_m$, uure 4 : $\frac{1}{2} I_m + \frac{1}{2} I_m = I_m$, uurete 5 ja 6 poolt

tekitatud mmj. on võrdne nulliga, uure 7 tekitab mmj.: $\left(-\frac{1}{2}I_m - \frac{1}{2}I_m\right) = -I_m$ jne. Vastavalt sellele on joonestatud resulteeriv mmj. kõver (joon. 23-6,*b*). Kõigi uurete poolt tekitatud mmj. joonisele kandmisel saame astmelise kõvera. Antud kõvera abstsisstelje leidmiseks joonestame horisontaalsirge, mis jagab antud sirge ja astmelise kõvera vahelise pindala kahte võrdsesse ossa. Niisugune abstsisstelje leidmise moodus põhineb asjaolul, et ühest poolusest väljuv magnetvoog, mis antud korral on võrdeline mmj. kõvera ja abstsisstelje vahelise pindalaga, peab võrduma teise poolusesse mineva magnetvooga.

Joonisel 23-6, *b* toodud kõver ei ole täiesti siinuseline, seepärast sisaldab mähise mmj. kõver peale põhiharmoonilise, mille poollaine pikkus on võrdne masina poolusejaotusega, ka kõrgemaid harmoonilisi.

Analoogiliselt eeltooduga on joonisel 23-6, *c* joonestatud resulteeriva mmj. kõver hetke jaoks $t = \frac{1}{12}\,T$ (T — vahelduvvoolu periood), mil $i_a = \frac{\sqrt{3}}{2}I_m$, $i_b = 0$, $i_c = -\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$. Nagu näeme, liigub resulteeriva mmj. kõver voolu muutumisel $T/12$ (s. o. $\frac{360°}{12} = 30°$) võrra staatori ümbermõõdul $\frac{2p \cdot 180°}{12} = \frac{2 \cdot 180°}{12} = 30°$ võrra. Seejuures muutub resulteeriva mmj. kõvera kuju, nagu selgub kõverate *b* ja *c* võrdlemisel. See muutus on tingitud asjaolust, et põhi- ja kõrgemad harmoonilised liiguvad erinevate kiirustega. Seega muudavad erinevatel ajahetkedel üksikud harmoonilised oma asendit üksteise suhtes, mistõttu muudab oma kuju ka resulteeriv mmj. Üksikute harmooniliste sisaldus resulteeriva mmj. kõveras jääb seejuures muidugi muutumatuks.

Mitmefaasiliste mähiste mmj. analüüsi tulemusena võime kokkuvõttes teha järgmised järeldused.

1. Mähiste poolt tekitatud resulteeriv mmj. jaotub staatori ümbermõõdul mittesiinuseliselt.

2. Iga hetke jaoks võib joonestada mmj. kõvera, mis mähise uuretesse paigutamise tõttu on astmeline.

3. Ühefaasilistes mähistes pulseerib mmj. kõver ajaliselt, säilitades oma kuju. Kolmefaasiliste mähiste korral liigub mmj. kõver staatori ümbermõõdul, muutes perioodiliselt oma kuju.

4. Mmj. kõverat võib vaadelda koosnevana siinuseliselt muutuvatest põhi- ja kõrgematest harmoonilistest.

VAHELDUVVOOLUMÄHISTE INDUKTIIVTAKISTUSED

24-1. PÕHIMÕISTEID

Kui on ergutatud ainult staatori mähis (vt. joon. 23-1), võime üldisest magnetväljast eraldada osa, mis on aheldatud ainult staatori mähisega ega võta osa üldisest energia ülekandmisest magnetvälja kaudu ühest mähisest teise. See magnetvälja osa, mida nimetatakse puisteväljaks ja mis muutub mähist ergutava vahelduvvoolu sagedusega, indutseerib antud mähises enda-induktsiooni elektromotoorse jõu ehk puiste elektromotoorse jõu e_s, mida arvestatakse masina tööomaduste uurimisel nn. puiste-induktiivsuste S või puisteinduktiivtakistuste $x_s = \omega S$ abil: $e_s = \omega S I_m \cdot \cos \omega t$ (kus $\omega = 2\pi f$ — nurksagedus).

Seda osa puisteväljast, mis asub ainult uurdes asuva mähise-osa ümber, nimetatakse *uurdepuisteväljaks*. Uurdest väljaulatuvate mähiseosade (laupühenduste) ümber tekib samuti magnetväli, mis moodustab nn. *laupühenduste puistevälja*, kuna staatori ja rootori mähiste laupühenduste vahelise õhu suure magnetilise takistuse tõttu peaaegu puudub laupühenduste vaheline mõlema mähisega aheldav magnetväli.

Nagu hiljem üksikute vahelduvvoolumasinate lähemal käsitlemisel selgub, määratakse nende põhilised tööomadused mähiste mmj. poolt õhupilus tekitatud magnetvälja põhiharmoonilisega. Kuid mähiste mmj. uurimisel (vt. ptk. XXIII) selgus, et peale välja põhiharmoonilise tekivad õhupilus veel välja kõrgemad harmoonilised. Need harmoonilised, erinevalt põhiharmoonilistest, masina ühtlasel sümmeetrilisel koormusel kas üldse ei indutseeri vastasasuvas mähises vastuinduktsiooni elektromotoorset jõudu või nende induktiivne sidestus on niivõrd nõrk, et seda võib suurema osa põhiküsimuste käsitlemisel jätta tähele panemata. Kuna ergutatud mähiseosa suhtes kõrgemad harmoonilised liiguvad toitevoolu sagedusega ja indutseerivad seega mähises põhisagedusega emj., siis nende küsimuste käsitlemisel, kus me otseselt ei vaatle kõrgemate harmooniliste mõju masina talitlustingimustele, võime nende mõju arvesse võtta nende poolt indutseeritavat elektromotoorset jõudu iseloomustavate induktiivtakistustena. Seega võib mmj. kõrgemate harmooniliste poolt esilekutsutud magnetvälja samuti lugeda puistevälja hulka, sest see ei võta pöörleva masina korral otseselt osa energia ülekandmisest ühest mähisest teise. Kuna kõrgemate harmooniliste puisteväli eksisteerib masina õhupilus, siis nimetatakse seda sageli ka õhupilu-puisteväljaks. Teiselt poolt kujutab kõrgemate harmooniliste poolt tekitatud puisteväli vahet mähise poolt loodud koguvoo ja põhiharmoonilise vahel n.-ö. diferentsi, mistõttu kirjanduses nime-

tatakse kõrgemate harmooniliste poolt tekitatud puistevälja sageli ka *diferentsiaalpuisteks.*

Allpool vaatleme iga puisteliigi poolt tekitatud induktiivtakistust lähemalt. Seejuures lähtume eeldusest, et staatori ja rootori südamike magnetiline läbitavus $\mu = \infty$, s. o. need südamikud ei avalda magnetvoole mingit takistust ning ainukeseks takistuseks tekitatud magnetvoole on õhupilu magnetiline takistus.

Siinjuures peame veel märkima, et füüsikaliselt on masinas olemas vaid summaarne magnetväli ja ülaltoodud jaotus, mis on muidugi esmajoones võimalik lineaarsetes magnetahelates ($\mu = \text{const}$ või $\sin \mu = \infty$), on vajalik masina töö analüüsiks ning üksikute parameetrite arvutuslikuks määramiseks. Parameetrite arvutusliku määramise õigsuse kontrolliks on muidugi nende katseline määramine.

24-2. ÕHUPILU MAGNETVÄLJA POOLT TEKITATUD INDUKTIIVTAKISTUSED

Vaatleme siinkohal õhupilu magnetvälja põhiharmoonilise poolt tekitatud induktiivtakistust. Õhupilu magnetvälja kõrgemate harmooniliste poolt tekitatud induktiivtakistused kanname, nagu eespool selgitatud, puiste induktiivtakistuste hulka.

Kolmefaasilise masina resulteeriva mmj. põhiharmoonilise amplituud F_{m1} on määratud seosega (23-6). Kogu masina ümbermõõdul ühtlase õhupilu korral tekitab mmj. põhiharmooniline siinuseliselt jaotatud induktsiooni amplituudiga

$$B_{m1} = \frac{\mu_0}{\delta} F_1, \tag{24-1}$$

kus δ on õhupilu laius.

Uurete olemasolu tõttu suureneb magnetvoo teekond, s. t. õhupilu magnetiline takistus. Viimast asjaolu saame arvesse võtta, kui asendame valemis (24-1) tegeliku õhupilu laiuse δ õhupilu efektiivse laiusega $\delta' = k_\delta \delta$, kus $k_\delta > 1$ on tegur, mis arvestab õhupilu magnetilise takistuse suurenemist õhupilu uurestuse tõttu. Õhupilu tõkestus suureneb veel südamike, eriti hammaste magnetilise küllastuse tõttu, sest induktsioon hammastes ulatub kuni 20 kG = 2 Wb/m^2. Aktiivraua küllastuse arvestamiseks jagame induktsiooni avaldise (24-1) veel küllastusteguriga $k_\mu > 1$.

Seega tegelik induktsiooni amplituud avaldub valemiga

$$B_{m1} = \frac{\mu_0}{k_\mu k_\delta \delta} F_1. \tag{24-2}$$

Kuna antud magnetväli on jaotatud poolusejaotuse $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ ulatuses siinuseliselt, siis tema poolt tekitatud magnetvoo amplituud

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{m1} \tau l = \frac{\mu_0}{k_\mu k_\delta} \cdot \frac{Dl}{\delta p} F_1. \qquad (24\text{-}3)$$

Selle voo poolt tekitatud endainduktsiooni emj. on määratud valemiga (21-18). Voole vastava induktiivse takistuse leiame seosest

$$x_{11} = \omega L = \frac{E_f}{I}, \qquad (24\text{-}4)$$

kus E_f — voo (24-3) poolt indutseeritud elektromotoorne jõud faasimähises,

L — mähise induktiivsus.

Asetades valemisse (24-3) F_1 väärtuse seosest (23-6), saame õhupilu magnetvälja endainduktsiooni induktiivtakistuse x_1 (24-4) jaoks avaldise

$$x_{11} = 2mf \frac{\mu_0 Dl}{k_\delta k_\mu \delta} \cdot \left(\frac{w k_w}{p}\right)^2. \qquad (24\text{-}5)$$

Näitena määrame x_1 asünkroonmasinale A51-4, mille vastavad andmed on järgmised: $D = 0{,}152$ m, $l = 0{,}090$ m, $\delta = 0{,}0004$ m, $w = 192$ keerdu, $p = 2$, $k_w = 0{,}96$, $k_\mu k_\delta = 1{,}1 \cdot 1{,}3 = 1{,}43$, $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Valemi (24-5) põhjal

$$x_{11} = 2 \cdot 3 \cdot 50 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}152 \cdot 0{,}09}{1{,}43 \cdot 0{,}0004} \cdot \left(\frac{192 \cdot 0{,}96}{2}\right)^2 = 76{,}6\ \Omega.$$

Ka mmj. kõrgemad harmoonilised tekitavad masina õhupilus magnetvälja, mille poolt indutseeritud elektromotoorset jõudu võetakse arvesse induktiivtakistuse näol, nagu magnetvälja põhiharmoonilise puhulgi valemi (24-4) abil. Eespool selgus, et mmj. kõrgemate harmooniliste poolt tekitatud magnetvälju võib lugeda puisteväljadeks ning neid arvesse võtvaid induktiivtakistusi — puisteinduktiivtakistusteks.

24-3. PUISTE-INDUKTIIVTAKISTUSED

Nagu juba eespool oli märgitud, määratakse masina tööomadused õhupilu magnetvälja põhiharmoonilise poolt. Kõik teised mähise poolt tekitatud magnetväljad (magnetväljad uurde ja laupühenduste ümber ning õhupilu magnetvälja harmoonilised) moodustavad puistemagnetvälja ja nende poolt indutseeritakse mähistes puiste emj. e_s, mille efektiivväärtus siinuseliselt muutuva vahelduvvoolu korral

$$E_s = 2\pi f S I = x_s I, \qquad (24\text{-}6)$$

kus I — mähist läbiva vahelduvvoolu efektiivväärtus;

S — mähise puisteinduktiivsus;
$x_s = \omega S$ — mähise puisteinduktiivtakistus.

Uurde puistevoo poolt tekitatud puisteinduktiivsus on leitav seosest

$$S_u \equiv \frac{s_u \Phi_u}{I}, \tag{24-7}$$

kus s_u — keerdude arv uurdes,
Φ_u — uurde puistevoog.

Uurde puistevoog Φ_u oleneb teda põhjustavast uurde koguvoolust Is_u ja uurde magnetilisest juhtivusest Λ_u. Viimane on seda suurem, mida väiksem on puistevoo teekond, s. o. uurde laius b, ja mida suurem on uurde kõrgus h ja pikkus l:

$$\Lambda_u \equiv \mu_o \frac{h}{b} l = \mu_o \lambda_u l,$$

kus $\lambda_u = \frac{h}{b}$ — uurde puistevoo suhteline magnetiline juhtivus pooli keeru ühe pikkusühiku kohta.

Seega

$$\Phi_u = Is_u \Lambda_u = Is_u \mu_o \lambda_u l$$

ning

$$S_u = \mu_0 s_u^2 \lambda_u l.$$

Kui antud faasi pooligrupp on asetatud q uurdesse, siis pooligrupi uurde puiste emj. suureneb q korda. Edasi, kui ühe faasi mähis koosneb näiteks p pooluspaarist, kusjuures kõik p pooligruppi on ühendatud järjestikku, siis puiste emj. ja induktiivtakistus suurenevad veel p korda. Üldine järjestikku ühendatud keerdude arv on sel korral $w = s_u pq$, seega mähise uurde puistevoost tingitud ühe faasi puisteinduktiivsus

$$S_{uf} = qpS_u = s_u^2 qp\mu_0 \lambda_u l = \mu_0 \frac{w^2}{pq} \lambda_u l. \tag{24-8}$$

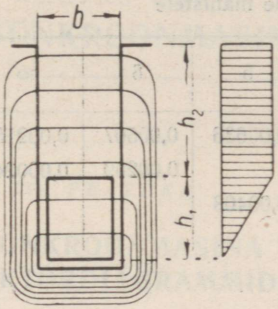
Ühekihilise täissammuga mähise korral, mis asub ühesuguse laiusega b uurdes (joon. 24-1), on ekvivalentne uurde erijuhtivus λ_u leitav valemist:

$$\lambda_u = \frac{h_1}{3b} + \frac{h_2}{b}. \tag{24-9}$$

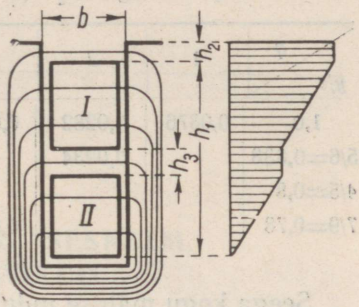
Kahekihilise täissammuga mähise korral, mis asub ristkülikulises uurdes (joon. 24-2), on uurde erijuhtivus

$$\lambda_u = \frac{h_1}{3b} + \frac{h_2}{b} - \frac{h_3}{12b}. \tag{24-10}$$

Lühendatud sammuga kahekihilise mähise ($y \geqslant \frac{2}{3}\tau$) ekvivalentse erijuhtivuse saame ülaltoodud valemi (24-10) põhjal, korrutades tulemust parandusteguriga



Joon. 24-1. Ühekihilise mähise uurde puistevälja pilt



Joon. 24-2. Kahekihilise mähise uurde puistevälja pilt

$$k_y = \frac{3\beta + 1}{4}, \tag{24-11}$$

kus β — suhteline mähise samm poolusejaotuse τ ühikutes.

Mähise laupühenduste ja diferentsiaalpuiste induktiivsuse avaldised (S_1 ja S_d) on samased seosega (24-8), kui selles uurde puiste erijuhtivus λ_u asendada vastavalt laupühenduste puiste erijuhtivusega λ_l ja diferentsiaalpuiste erijuhtivusega λ_d.

Laupühenduste puisteväli on keerulise kujuga, mistõttu puiste-induktiivsuste matemaatiline analüüs on raskendatud. Praktikas leiavad praegusel ajal peamist kasutamist empiiriliselt tuletatud seosed, mis pahatihti annavad üksteisest tublisti erinevaid tulemusi. Toome allpool neist mõned näited.

Ühekihiliste kahekorruseliste mähiste puiste erijuhtivus

$$\lambda_l = 0{,}67 \frac{q}{l} (l_l - 0{,}64\tau). \tag{24-12}$$

Koonusekujuliste laupühendustega kahekihilise mähise puhul kehtib seos

$$\lambda_l = 0{,}34 \frac{q}{l} (l_l - 0{,}64\beta\tau) k_y^2, \tag{24-13}$$

kus k_y — mähise kõõlutegur.

Diferentsiaalpuiste erijuhtivust saab arvutada valemiga

$$\lambda_d = \frac{mqk^2_w \tau}{\pi^2 k_\delta k_\mu \delta} k_d, \tag{24-14}$$

kus k_d — diferentsiaalpuiste tegur.

Diferentsiaalpuiste teguri k_d väärtused kolmefaasiliste mähiste kohta on toodud tabelis 24-1.

Kogu mähise puistejuhtivust võib vaadelda koosnevana uurde-, laupühenduste ja diferentsiaalpuiste juhtivuste summast, s. o.

$$\lambda = \lambda_u + \lambda_l + \lambda_d.$$

Tabel 24-1

Diferentsiaalpuiste teguri k_d väärtusi kolmefaasilistele mähistele

y/τ \ q	1	2	3	4	5	6	∞
1,0	0,0876	0,0282	0,0138	0,00882	0,00636	0,00507	0,00215
5/6=0,833		0,0234		0,00636		0,00289	0,00024
4/5=0,8					0,00408		
7/9=0,78			0,0109				

Seega kogu mähise induktiivtakistus

$$x_s = \omega S = 2\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l\lambda = k_x \lambda, \qquad (24\text{-}15)$$

kus

$$k_x = 2\pi f \mu_0 \frac{w^2 l}{pq}.$$

Toodud mähise puisteinduktiivtakistuse üldvalemist (24-15) selgub, et mähise puisteinduktiivtakistus on võrdeline toitevoolu sagedusega f, keerdude arvu ruuduga w^2, uurde aktiivse pikkusega l ning puiste erijuhtivusega λ.

XXV PEATÜKK

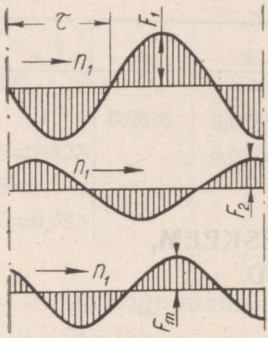
ASÜNKROONMASINA TÖÖPROTSESS, ASESKEEM, VEKTORDIAGRAMMID, KARAKTERISTIKUD

25-1. ASÜNKROONMASINA TÖÖPROTSESS

Eespool (p. 20-2) tutvusime asünkroonmasina tööpõhimõtetega ja töörežiimidega. Siinkohal käsitleme lähemalt asünkroonmasina töötamist koos seda iseloomustavate füüsikaliste suurustega. Asünkroonmasina põhiküsimuste käsitlemisel vaatleme 1) ainult kõigi vahelduvate suuruste (vool, pinge, mmj. jne.) põhiharmoonilisi, sest viimased määravad peamised töökarakteristikud, ja 2) füüsikalisi nähtusi mistahes kiiruse ja suunaga pöörleva rootori korral, selleks et anda analüüsile üldine iseloom, mida oleks võimalik hiljem kasutada ükskõik millise tööolukorra vaatlemisel.

Asünkroonmasina staatori ja rootori mähised on sidestatud üksteisega magnetiliselt mõlema mähisega aheldatud ühise magnetvoo abil (vt. p. 20-2). Seega on magnetväli energia ülekande lüliks ühest mähisest teise. Nagu juba eespool selgus (p. 20-2), liiguvad staatori ja rootori poolt tekitatud magnetvälja põhiharmoonilised seisva staatori suhtes ühesuguse kiirusega n_1 ning on seega üksteise suhtes liikumatud. Viimane asjaolu võimaldabki vaadelda nende koosmõju resulteeriva magnetvälja tekitamisel.

Magnetvälja tekitamiseks vajalik mmj. kutsutakse esile mähist läbiva voolu poolt. Kogu staatorimähise poolt loodud magnetomotoorsest jõust F_1 läheb osa põhimagnetvälja tekitamiseks ehk magneetivaks magnetomotoorseks jõuks F_m ja osa rootori mmj. F_2 kompenseerimiseks. Vastavalt sellele sisaldab primaarvool I_1 magneetivat komponenti I_m ning rootori voolu kompenseerivat koormuskomponenti. Staatori ümbermõõdul siinuseliselt jaotatud ja sünkroonkiirusega n_1 liikuvad magnetomotoorsed jõud F_2 ja F_1 omavad omavahel sellist ruumilist nihet, mis on küllaldane resulteeriva mmj. F_m tekitamiseks (joon. 25-1). Mmj. F_m suurus on määratud tema poolt tekitatud vajaliku magnetvoo suurusega. Magnetvoo Φ suurus on omakorda määratud sellega, et tema poolt staatori mähises indutseeritud emj. koos pingelangudega tasakaa-



Joon. 25-1. Asünkroonmasina magnetomotoorsete jõudude F_1, F_2 ja F_m graafik

lustab staatori mähisele rakendatud pinge. Seega töötava masina mmj. tasakaalu võrrand on vektor- või komplekskujul järgmine:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m. \tag{25-1}$$

Asetades sellesse seosesse mmj. suuruse valemist (23-6), saame:

$$\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot \frac{w_1 k_{w1}}{p} \dot{I}_1 + \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_2 \cdot \frac{w_2 k_{w2}}{p} \dot{I}_2 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot \frac{w_1 k_{w1}}{p} \dot{I}_m$$

või pärast mõlema poole üksikute liikmete jagamist suurusega $\frac{\sqrt{2}}{\pi} m_1 w_1 k_{w1}$:

$$\dot{I}_1 + \frac{m_2 w_2 k_{w2}}{m_1 w_1 k_{w1}} \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \frac{1}{k_i} \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m, \tag{25-2}$$

kus

$$k_i = \frac{I_2}{I_2'} = \frac{m_1 w_1 k_{w1}}{m_2 w_2 k_{w2}} \tag{25-3}$$

on voolude taandamistegur ja suurus

$$I_2' = \frac{1}{k_i} I_2 \tag{25-4}$$

on staatori poolele taandatud rootori vool.

Asünkroonmasina staatori ja rootori mähiste poolt tekitatud kogu magnetvälja võime jagada põhimagnetväljaks ja puistemagnetväljaks (vt. p. 24-1). Põhimagnetvälja jõujooned läbivad õhupilu, staatori ja rootori hambaid ning ikkeid ning on seega aheldatud nii staatori kui ka rootori mähistega. Energia ülekandjaks ühest mähisest teise on põhimagnetväli ja temaga võrdeline põhimagnetvoog Φ.

Põhimagnetvoog Φ indutseerib staatori mähises emj. (vt. valem 21-18)

$$E_1 = 4{,}44\, f_1 w_1 k_{w1} \Phi. \tag{25-5}$$

Rootori mähises, mis liigub põhimagnetvälja suhtes libistusega s, indutseeritakse emj.

$$E_{2s} = 4{,}44\, f_2 w_2 k_{w2} \Phi = 4{,}44\, f_1 s w_2 k_{w2} \Phi = sE_2, \tag{25-6}$$

kus $f_2 = sf_1$ ja

$$E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 k_{w2} \Phi \tag{25-7}$$

on rootori mähises indutseeritud emj., juhul kui $s = 1$, s. o. seisva rootori korral.

Puisteväli, mis on aheldatud vaid teda tekitava mähisega (vt. p. 24-1), kutsub viimastes esile puiste-endainduktsiooni emj. Viimase suurus leitakse mähist läbiva voolu ja vastava puiste-induktiivtakistuse korrutisena Ix_1.

Samuti põhjustab koormusel tekkiv vool I mähise aktiivtakistusel pingelangu Ir.

Staatorile rakendatud pinge U_1 ja mähises indutseeritud emj. E_1 vahe kaetakse seega pingelangudega mähise aktiiv- ja induktiivtakistusel.

Kuna asünkroonmasina rootori mähis kujutab endast suletud vooluahelat, milles puuduvad välised vooluallikad, siis indutseeritud emj. E_{2s} läheb täiesti voolu I_2 poolt mähise aktiiv- ja induktiivtakistustel tekitatud pingelangude katteks.

Esitatust järeldub, et töötava asünkroonmasina elektromagnetilised protsessid kulgevad analoogiliselt transformaatoriga, ainult selle vahega, et staatori ja rootori vahel toimub elektromagnetiline sidestus pöördvälja abil, ning et indutseeritud emj. sagedused staatori ja rootori mähistes on üldjuhul erinevad.

25-2. PÖÖRLEVA ASÜNKROONMASINA TAANDAMINE SEISVALE

Staatori ja rootori mmj. põhiharmoonilise poolt tekitatud magnetväljad tekitavad koos pööreldes resulteeriva magnetvälja. Staatori ja rootori magnetväljad liiguvad koos sünkroonselt igal võimalikul režiimil, s. t. olenemata libistusest s. Seega elektromagnetiliste protsesside seisukohalt midagi ei muutu, kui vaatleme asünkroonmasina tööd juhul, kui $s = 1$, s. o. seisva rootori korral, eeldusel, et staatori ja rootori voolud oma suuruselt ja faasilt jäävad muutumatuks.

Kuna asünkroonmasina töötamisel rootoris indutseeritud emj. on määratud seosega (25-6), rootori ahela kogutakistus aga omab väärtust $z_{2s} = \sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}$, siis tekkiva voolu absoluutväärtus on leitav seosest

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}. \qquad (25\text{-}8)$$

Kui jagame selle valemi parema poole (25-8) lugejat ja nimetajat ühe ja sama suurusega s, siis voolu I_2 väärtus ei muutu ja avaldis (25-8) kujuneb järgmiselt:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}. \qquad (25\text{-}9)$$

Antud seosed erinevad mitte ainult oma kujult, vaid ka füüsikaliselt sisult. Valem (25-8) on kehtiv pöörleva masina korral, kui rootoris indutseeritakse emj. sE_2 libistussagedusel. Valem (25-9) kehtib seisva masina korral ($s = 1$), kui rootoris indutseeritakse põhisagedusega emj. E_2. Järelikult võime pöörleva masina asemel vaadelda seisvat masinat, kui loeme rootori aktiivtakistuseks väärtuse r_2/s, mis oleneb libistusest, kuna emj. ja induktiivtakistus libistusest enam ei olene. Valemi (25-8) lugeja jagamine libistusega s tähendab pöörleva masina rootori emj. asendamist seisva rootori elektromotoorse jõuga. Selle valemi nimetaja jagamine näitab, kuidas on vaja muuta rootori takistusi, et vool jääks samaks.

Seisva masina korral on meil täielik analoogia töötava transformaatoriga.

Rootori aktiivtakistuse võime avaldada järgmiselt:

$$\frac{r_2}{s} = r_2 + r_2 \frac{1-s}{s}. \qquad (25\text{-}10)$$

Järelikult võime rootoriahela aktiivtakistust vaadelda koosnevana reaalsest rootori mähise aktiivtakistusest r_2 ja lisa-aktiivtakistusest $r_2 \frac{1-s}{s}$. Seejuures võime aktiivtakistust $r_2 \frac{1-s}{s}$ käsitada välistakistusena, mis on lülitatud seisva rootori mähisega järjestikku. Sel korral võib asünkroonmasina tööprotsessi kujutada transformaatori tööprotsessina, kui viimane töötab puhtaktiivkoormusele. Niisuguse transformaatori poolt antav elektriline võimsus $m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$ on võrdne asünkroonmasina mehaanilise võimsusega P_m rootori võllil, mida masin annab töötamisel näiteks mootorina mingil libistusel s. Generaatori töörežiimi korral ($s \geqslant 0$ kuni $-\infty$), mil libistus omab negatiivset väärtust, muudab oma märki ka võimsus $m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$. See on füüsikaliselt seletatav sellega, et antud korral võllilt saadav mehaaniline energia muundatakse elektrienergiaks ja antakse ära võrku. Lisatakistus $r_2 \frac{1-s}{s}$ tuleb lugeda generaatorirežiimis negatiivseks. Kuigi negatiivseid aktiivtakistusi tegelikkuses ei esine, on võimalik vastav mõiste formaalselt sisse viia. Kui positiivne aktiivtakistus on energia tarbijaks, siis negatiivne takistus on energia allikaks või generaatoriks. Vastavalt sellele võib iga generaatorit formaalselt vaadelda kui negatiivset aktiivtakistust.

Asünkroonmasina tööprotsessi vaatlemisel on sageli otstarbekohane kasutada mitte tegelikke, vaid staatori poolele taandatud rootori ahela parameetreid. Taandamise protsessi võib endale ette kujutada nii, et reaalne rootori mähis asendatakse samasugusega, nagu see on staatoril, kusjuures uue rootorimähise pinged, voolud ja takistused tuleb muuta selliselt, et mähise toime jääks kõigiti samaks. Transformaatori korral toimus sekundaarahela taandamine primaarahelale vastavate parameetrite korrutamise teel ülekandeteguriga k või selle ruuduga (vt. p. 12-2). Asünkroonmasina korral on taandamine keerulisem staatori ja rootori mähise ruumilise jaotuse tõttu õhupilu ümbermõõdul ning ka selle tõttu, et staatori ja rootori faaside arvud võivad olla erinevad.

Valemite (25-5) ja (25-7) põhjal saame *elektromotoorsete jõudude taandamisteguri* kohta avaldise

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}}, \tag{25-11}$$

mis erineb transformaatori elektromotoorsete jõudude taandamistegurist mähisetegurite suhtega.

Seega on rootori emj. (staatori poolele) taandatud väärtus

$$E_2' = k_e E_2 = E_1. \tag{25-12}$$

Emj. taandamisteguri faasirootoriga asünkroonmasina puhul võime ligikaudu määrata katseliselt, kui toidame staatori (või rootori) mähist sümmeetrilise pingega vooluallikast avatud rootori- (või staatori-) mähise puhul ja mõõdame mähistel vastavad pinged. Sel korral

$$E_1 \approx U_{10} \text{ ja } E_2 = U_{20}$$

ning järelikult

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}. \tag{25-13}$$

Voolu taandamistegur on määratud sellega, et mmj. reaalse rootori mähisel

$$F_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{m_2}{2} \frac{w_2 k_{w2}}{p} I_2$$

peab olema võrdne taandatud mähise magnetomotoorse jõuga

$$F_2' = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{m_1}{2} \frac{w_1 k_{w1}}{p} I_2'.$$

Sellest tingimusest saamegi voolu taandamisteguri k_i väärtuse (25-3), mis oleneb ka faaside arvu vahekorrast.

Rootori taandatud aktiivtakistusi r_2' määrame selliselt, et voolu poolt tekitatud kaod aktiivtakistusel ei muutuks, s. t.

$$m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2',$$

millest

$$r_2' = r_2 \frac{m_2 I_2^2}{m_1 I_2'^2} = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 w_1 k_{w1}}{m_2 w_2 k_{w2}} \right)^2 =$$

$$= r_2 \frac{w_1 k_{w1}}{w_2 k_{w2}} \cdot \frac{m_1 w_1 k_{w1}}{m_2 w_2 k_{w2}}$$

ehk

$$r_2' = k_e k_i r_2 = k r_2, \tag{25-14}$$

kus tegurit

$$k = k_e k_i \tag{25-15}$$

nimetatakse *takistuse taandamisteguriks.*

Rootori induktiivtakistuse x_2 taandamisel staatori poolele (x_2') säilitame nihkenurga rootori emj. ja voolu vahel muutumatuna, s. t.

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x_2'}{r_2'},$$

millest

$$x_2' = \frac{r_2'}{r_2} x_2 = k x_2. \tag{25-16}$$

Asünkroonmasina lühisekatse teostatakse analoogiliselt transformaatori lühisekatsega, kusjuures rootori ahel on lühistatud ning rootor ise on pidurdatud ja seisab. Tavaliselt on vaja katse teostada madalama pinge juures, et piirata voolude väärtusi. Lühisekatsest määratakse nn. lühisetakistused:

$$r_k = r_1 + r_2' \quad \text{ja} \quad x_k = x_1 + x_2'.$$

Kuna lühisekatse teostatakse madalama pinge juures, siis ka magnetvoog omab väikest väärtust. Seetõttu võime samuti nagu transformaatori lühise korralgi (vt. p. 12-4) nende väiksuse tõttu jätta rauaskaod arvesse võtmata. Võrgust võetav aktiivvõimsus asünkroonmasina lühisel P_k läheb seega peamiselt staatori ja rootori mähiste vaseskadude katteks, s. t.

$$P_k = p_{v1} + p_{v2} = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2'^2 r_2' =$$

$$= m_1 I_1^2 r_k.$$

Erinevalt transformaatorist pole asünkroonmasina lühisetakistused Z_k ja x_k küllastusnähtuse tõttu mitte alati konstantsed, vaid sõltuvad, eriti kinniste uuretega masinate korral, lühisvoolu tugevusest I_k.

Asünkroonmasinates on ligikaudu $r_1 \approx r_2'$ ja $x_1 \approx x_2'$. Suhtelistes ühikutes on kõik need takistused mõne sajandiku piirides, kusjuures suurematel masinatel on võrreldes aktiivtakistustega

r_1, r_2' ülekaalus puistetakistused x_1, x_2'. Parameetrite suhteliste suuruste all mõistame nende jagatist nn. nimiparameetriga x_n, milleks on faasipinge ja faasivoolu suhe, s.o. $x_n = \frac{U_n}{I_n}$.

25-4. ASÜNKROONMASINA ASESKEEM

Asünkroonmasina töötamisomaduste uurimisel osutavad suurt abi aseskeemid. Aseskeemi kasutamise korral asendame elektromagnetiliselt sidestatud elektriahelad elektriliselt seotud elektriahelatega, mis võimaldab lihtsalt leida põhisuuruste omavahelised seosed.

Nagu eespool selgus (p. 25-2), sarnaneb seisvale olukorrale ($s = 1$) taandatud asünkroonmasin oma põhimõtte poolest transformaatoriga. Järelikult sarnaneb asünkroonmasina aseskeem transformaatori aseskeemiga (vt. p. 12-3).

Ainuke erinevus seisab selles, et transformaatori koormus on üldjuhul muutuv, asünkroonmootori koormuseks aga on aktiivtakistus $r_2 \frac{1-s}{s}$. Seega analoogiliselt transformaatoriga saame asünkroonmootori jaoks T-kujulise aseskeemi, mis on toodud joonisel 25-2, *a*.

Toodud aseskeemil kujutab r_m magneetimisahela aktiivtakistust ja on võrdeline rauaskaoga:

$$r_m = \frac{p_r}{U_1^2}.$$

Suurus x_m on magneetimisahela induktiivtakistus, mis on tingitud magnetvoo põhiharmoonilisest õhupilus:

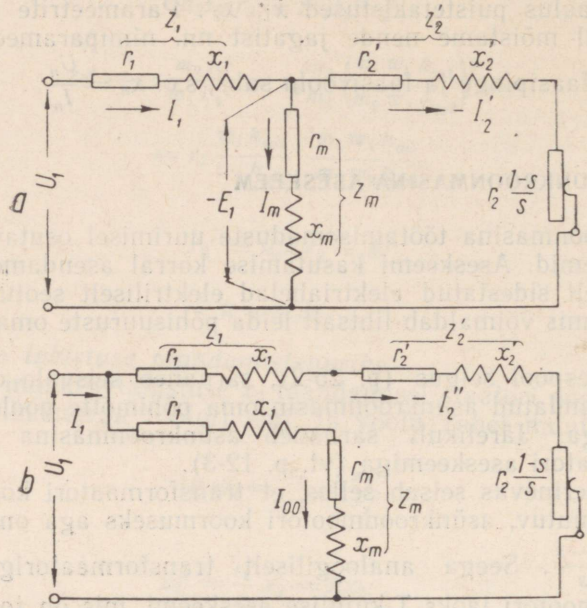
$$x_m = \frac{\omega \Psi_1}{I_m}.$$

Seega magnetvoo poolt indutseeritud emj.

$$E_1 = E'_2 = I_m \sqrt{r_m^2 + x_m^2}.$$

Suhtelistes ühikutes $r_m = \frac{r_m}{x_n} = 0{,}35 \ldots 0{,}05$ ja $x_m = \frac{x_m}{x_n} = 1{,}25 \ldots 4$, kusjuures toodud suuruste esimesed väärtused vastavad väikese võimsusega (kuni 10 kW) masinatele.

Niisuguse aseskeemi põhjal (joon. 25-2, *a*) toimub asünkroonmasina üksikute tööolukordade uurimine samuti nagu transformaatori korral. Näitena vaatame masina tööd ideaalsel tühijooksul ($s = 0$) ja lühisel ($s = 1$). Ideaalsel tühijooksul ($s = 0$) on asünkroonmasina koormust iseloomustav takistus lõpmata suur $\left(r_2 \frac{1-0}{0} = \infty\right)$ ning antud aseskeem kujutab transformaatori



Joon. 25-2. Asünkroonmasina aseskeemid:
a — normaalne ehk *T*-kujuline; *b* — väljatoodud magneetimisahelaga ehk *Γ*-kujuline

tööd tühijooksul. Sekundaarvooluahel on avatud ning primaarvooluahelasse on järjestikku lülitatud vaid takistused $r_0 = r_1 + r_m$ ja $x_0 = x_1 + x_m$, mis määravad ideaalse tühijooksuvoolu suuruse pingel U_1, s. o. $I_{00} = \frac{U_1}{\sqrt{r_0^2 + x_0^2}}$. Asünkroonmasina lühise puhul ($s = 1$), kui koormust iseloomustava takistuse väärtus $r_2 \frac{1-1}{1} = 0$, on magneetimisahel lühistatud väga väikeste takistustega r_2' ja x_2' ning teda võib mitte arvestada. Seega on asünkroonmasina vool lühisel määratud primaarpinge ja järjestikku lülitatud takistuste $r_k = r_1 + r_2'$ ja $x_k = x_1 + x_2'$ (lühisetakistused) suurustega, s. o.

$$I_k = \frac{U_k}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}.$$

Joonisel 25-2, *a* kujutatud T-kujuline aseskeem ei ole alati sobiv asünkroonmasina tööolukordade analüüsimiseks, sest vool I_2' oleneb peale koormust iseloomustava takistuse $r_2 \frac{1-s}{s}$ muutumise veel voolust magneetimisharus I_m. Viimane aga omakorda sõltub asünkroonmasina koormusest, sest näiteks voolu I_1 muutumisel muutub

ka pinge magneetimisharu otstel. Seepärast lihtsustame toodud aseskeemi magneetimisharu väljatoomisega primaarklemmidele. Selleks et vool magneetimisharus ei muutuks oma suuruselt, lülitame primaarklemmidele toodud magneetimisharusse järjestikku veel takistused r_1 ja x_1. Selliselt kujundatud asünkroonmootori aseskeemi, mis on toodud joonisel 25-2, *b*, nimetatakse Γ-kujuliseks. Selles aseskeemis on kaks haru, mõlemad pinge U_1 all. Magneetimisharu takistuseks on $Z_1 + Z_m$ ja teda läbib vool I_{00}, mis on ideaalse tühijooksu ($s = 0$) vool ega sõltu libistusest või koormusest. Teise haru vool I_2'' sõltub libistusest või koormusest ja on null, kui $s = 0$ ning on asünkroonmasina lühise puhul ($s = 1$) määratud klemmipinge ning järjestikku lülitatud takistuste r_1, x_1, r_2' ja x_2' väärtustega nagu T-kujulise aseskeemi korralgi.

Joonisel 25-2, *b* toodud aseskeemi järgi voolude arvutamisel tekib ebatäpsusi, sest see skeem ei arvesta asjaolu, et magneetimisvool tekitab pingelangu ka takistustes r_1 ja x_1. Seepärast, kui tahetakse saada täpsemaid tulemusi, seda eriti väiksema võimsusega asünkroonmootorite korral (võimsusega alla kilovati), samuti asünkroonmasinate töötamisel eri režiimidel (näit. kiiruse reguleerimisel sagedusega, töötamisel pika kaabelliini lõpus jne.), kui staatoriahela aktiiv- ja induktiivtakistused on suhteliselt suured, tuleb antud aseskeemi parameetritesse sisse viia vastavad parandustegurid. Nagu näitab lähem analüüs, jäävad magneetimisharu parameetrid (r_1, x_1, r_m ja x_m) endiseks, kuid peaahela parameetrid (r_1, x_1 ja r_2', x_2') võtavad kuju

$$r_1\sigma_1,\ x_1\sigma_1,\ x_2'\sigma_1^2 \text{ ja } \frac{r_2'}{s}\sigma_1^2 = \left(r_2' + r_2'\frac{1-s}{s}\right)\sigma_1^2,$$

kus parandusteguri σ_1 väärtus erineb tavaliselt ühest vähe ($\sigma_1 \approx$ $\approx 1{,}02 \ldots 1{,}05$). Masinatel võimsusega üle 2 kW võib parandusteguri leida valemiga

$$\sigma_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}. \qquad (25\text{-}17)$$

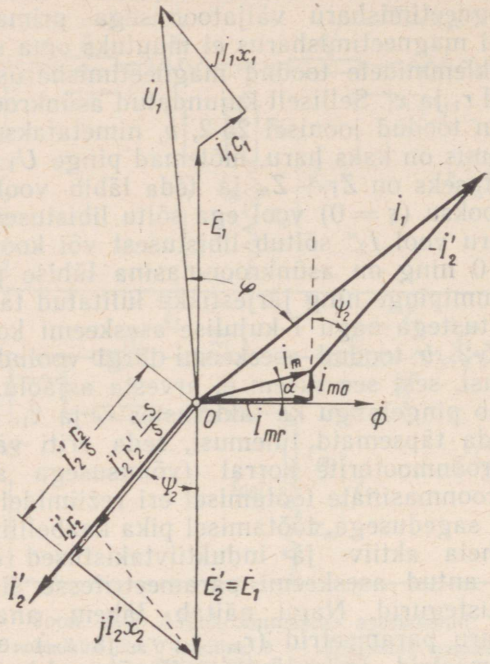
Täpne analüüs näitab, et üldjuhul σ_1 on kompleksarv $\dot{\sigma}_1 =$ $= \sigma_1 e^{-j\gamma}$, kus $\gamma = \operatorname{arc\,tg} \frac{r_1}{x_1 + x_m}$. Tavaliselt $\gamma = 2 \ldots 5°$.

25-5. ASÜNKROONMASINA VEKTORDIAGRAMM

Aseskeemi (joon. 25-2, *a*) alusel on võimalik joonestada asünkroonmasina vektordiagrammi.

Joonisel 25-3 on näidatud asünkroonmasina vektordiagramm juhul, kui viimane töötab mootorina.

Oletame, et kõik vektordiagrammi koostamiseks vajalikud suurused on meil teada. Vektordiagrammi joonestamist alustame mag-



Joon. 25-3. Asünkroonmootori vektordiagramm normaalsele aseskeemile (joon. 25-2, *a*)

netvoo vektorist $\dot{\Phi}$, mille kanname joonisele horisontaalsuunas vasakult paremale. Antud magnetvoo $\dot{\Phi}$ tekitajaks on magneetimisvoolu reaktiivkomponent $\dot{I}_{mr}$, mis, nagu me teame vahelduvvoolu teooriast, ühtib magnetvoo suunaga. Seega kanname vektori $\dot{I}_{mr}$ vektori $\dot{\Phi}$ suunas. Vahelduv magnetvoog kutsub asünkroonmasina aktiivrauas esile rauaskao, mille kompenseerimiseks on vaja magneetimisvoolu aktiivkomponenti $\dot{I}_{ma}$, mis on komponendist $\dot{I}_{mr}$ pööratud vektorite liikumise suunas 90°. Voolude $\dot{I}_{mr}$ ja $\dot{I}_{ma}$ geomeetriline summa annab üldise magneetimisvoolu I_m, mis suuruse poolest on lähedane staatori voolule asünkroonmootori tühijooksul. Tühijooksuvool on veidi suurem magneetimisvoolust, sest masina tühijooksul tuleb peale rauaskadude katta veel mehaanilised kaod ning rootori vaseskaod tühijooksul. Viimaste väiksuse tõttu võib aga suure täpsusega lugeda, et $I_0 \approx I_m$. Magneetimisvool $\dot{I}_m$ moodustab seega magnetvooga $\dot{\Phi}$ nurga α. Magnet-

voog $\dot{\Phi}$ indutseerib seisva rootoriga asünkroonmootoris staatori ja rootori mähistes võrgusagedusega emj. $E_1 = E_2'$, mis jääb ajaliselt maha 90°. Seega vektor $\dot{E}_1 = \dot{E}_2'$ on suunatud vertikaalselt allapoole. Staatori klemmidele rakendatud võrgupinge $\dot{U}_1$ sisaldab komponendi, mis tasakaalustab staatori mähise emj. $\dot{E}_1$, on temaga võrdne ja vastassuunaline. See komponent on näidatud vektorina — $\dot{E}_1$.

Masina koormamisel tekib rootoris vool $\dot{I}_2'$, mille suuruse määrab koormuse suurus masina võllil ja mis jääb rootori mähise induktiivse takistuse iseloomu tõttu rootori elektromotoorsest jõust $\dot{E}_2'$ maha nurga ψ_2 võrra, mille suuruse määravad rootori ahela parameetrid r_2' ja $x_2's$. Vool $\dot{I}_2$ tekitab aseskeemi sekundaarahela aktiivtakistustel pingelangud $\dot{I}_2'r_2 \frac{1-s}{s}$ ja $\dot{I}_2'r_2'$, mis ühtivad voolu I_2' suunaga ning moodustavad kokku pingelangu $I_2' \frac{r_2'}{s}$. Rootori induktiivtakistusel x_2' tekkiv pingelang $j\dot{I}_2'x_2'$ on voolust $\dot{I}_2'$ nurga 90° võrra ees. Vektorite $\dot{I}_2' \frac{r_2'}{s}$ ja $jI_2'x_2'$ geomeetriline summa võrdub rootori mähises indutseeritud elektromotoorse jõuga E_2'.

Vastavalt aseskeemile (joon. 25-2, *a*) kujutab endast primaarvool $\dot{I}_1$ magneetimisvoolu I_m ja sekundaarvoolu I_2' geomeetrilist summat ning tema väärtuse diagrammil leiame, liites voolule $\dot{I}_m$ voolu $-\dot{I}_2'$, mis on võrdne vooluga $\dot{I}_2'$ ning temale vastassuunaline.

Primaarvool $\dot{I}_1$ tekitab staatori mähise aktiivtakistusel r_1 vooluga samasuunalise pingelangu $\dot{I}_1r_1$. Pingelang staatori mähise induktiivtakistusel $j\dot{I}_1x_1$ on voolust 90° võrra ees. Vektorite $-\dot{E}_1$, $\dot{I}_1r_1$ ja $j\dot{I}_1x_1$ geomeetriline summa annab primaarpinge $\dot{U}_1$.

Asünkroonmootori vektordiagramm joonisel 25-3 on analoogiline transformaatori vektordiagrammiga (joon. 12-10), juhul kui viimane töötaks aktiivtakistusele $r_2' \frac{1-s}{s}$. Põhiline erinevus seisab selles, et asünkroonmasina magneetimisvool I_m moodustab 25...50% nimivoolust, transformaatoris aga ainult 3...10%. Üldiselt on teatud määral erinevad ka pingelangude suurused.

Vaatleme asünkroonmasina energia bilanssi mootori koormusel. Seejuures määrame üksikute võimsusliikidevahelised kvantitatiivsed seosed vastavalt joonisel 25-2, *a* toodud aseskeemile. Selleks jälgime aseskeemi üksikuid elemente alates vasakult (staatori klemmidelt) paremale ja vaatleme nendes elementides esinevaid võimsusi ning võimsuskadusid, mis vastavad võimsustele ja kaovõimsustele nendes masina osades.

Kolmefaasiline koormatud asünkroonmootor tarbib elektrivõrgust elektrilist võimsust

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1, \tag{25-18}$$

millest osa muutub staatori mähise aktiivtakistusel r_1 staatori vaseskaoks

$$p_{v1} = m_1 I_1^2 r_1, \tag{25-19}$$

ning osa läheb rauaskao

$$p_{r1} = m_1 I_m^2 r_m$$

katteks. Suurem osa aga antakse edasi rootorisse läbi õhupilu elektromagnetilise võimsusena (joon. 25-4)

$$P_{em} = P_1 - p_{v1} - p_{r1}. \tag{25-20}$$

Sellest võimsusest P_{em} muutub osa rootori mähise aktiivtakistusel r_2' rootori vaseskaoks (lõik BC joonisel 25-4)

$$p_{v2} = m_1 I_2'^2 r_2', \tag{25-21}$$

valdav enamus (lõik AB) aga muutub üldiseks mehaaniliseks võimsuseks

$$P_m = P_{em} - p_{v2}. \tag{25-22}$$

Kui sellest võimsusest lahutada mehaaniliste kadude võimsus p_m ning lisakao võimsus p_l, saame kasuliku võimsuse masina võllil:

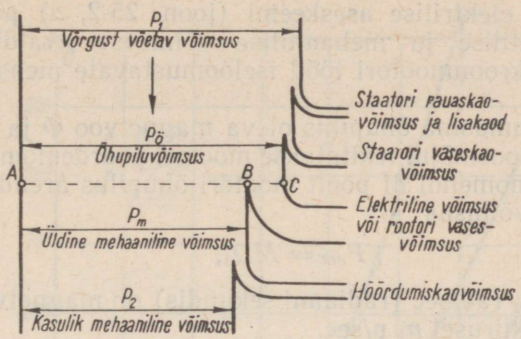
$$P_2 = P_m - p_m - p_l. \tag{25-23}$$

Lisakadu on tingitud mitmesugustest kõrvalnähetest (magnetvoo pulseerimisest staatori ja rootori hambulisuse tõttu, kõrgematest mmj. harmoonilistest jne.). Need kaod kaetakse rootori mehaanilise võimsuse arvel.

Toodud asünkroonmootori võimsuste muutumise käigule vastav energeetiline diagramm on toodud joonisel 25-4.

Asünkroonmasina mehaanilise ja elektromagnetilise võimsuse kohta võime saada seosed järgmiselt.

Nagu selgus asünkroonmasina tööprotsessi uurimisel pöörleva masina taandamisel seisvale (p. 25-2), võime asünkroonmasina poolt arendatavat mehaanilist võimsust vaadelda suurusena



Joon. 25-4. Asünkroonmasina energeetiline diagramm

$$P_m = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s}. \qquad (25\text{-}24)$$

Võttes arvesse avaldisi (25-21), (25-22) ja (25-24), saame elektromagnetilise võimsuse jaoks seose:

$$P_{em} = P_m + p_{v2} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} + m_1 I_2'^2 r_2' =$$

$$= m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}. \qquad (25\text{-}25)$$

Võimsused P_{em}, P_m ja p_{v2} vastavad aseskeemil (joon. 25-2, *a*) näidatud sekundaarharu aktiivtakistuste juures esinevatele võimsustele.

Eeltoodust järeldub, et asünkroonmootori kasulik võimsus koormusel P_2 on väiksem staatori poolt tarbitavast võimsusest P_1 summaarse kaovõimsuse $p_ü$ võrra, s. o.

$$P_2 = P_1 - p_ü,$$

kus summaarne kaovõimsus $p_ü$ kujutab üksikute kaovõimsuste summat:

$$p_ü = p_{v1} + p_{r1} + p_{v2} + p_m + p_l.$$

Masinalt saadava kasuliku võimsuse P_2 ja temale antud võimsuse P_1 suhet nimetatakse kasuteguriks:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - p_ü}{P_1} = 1 - \frac{p_ü}{P_1}. \qquad (25\text{-}26)$$

Generaatorirežiimi korral saame vastassuunalise pildi, s. t. rootori võlli kaudu saame mingilt ajamilt mehaanilist võimsust P_1, mis masinas muundatakse elektriliseks võimsuseks P_2 ja antakse edasi elektrivõrku.

Seostame elektrilise aseskeemi (joon. 25-2, *a*) põhjal saadud elektromagnetilise ja mehaanilise võimsuse avaldised (25-24) (25-25) asünkroonmootori tööd iseloomustavate mehaaniliste suurustega.

Asünkroonmasina õhupilus oleva magnetvoo Φ ja rootori koormusvoolu I_2 koosmõjul tekitatakse mootori pöördemoment $M \sim \Phi I_2$. Selle pöördemomendi M poolt mootori õhupilus arendatav elektromagnetiline võimsus

$$P_{em} = M\Omega_1, \tag{25-27}$$

kus $\Omega_1 = 2\pi n_1$ rad/sec (radiaani sekundis) on magnetvälja nurkkiirus sünkroonkiirusel n_1 p/sec.

Kuna rootor pöörleb nurkkiirusega

$$\Omega_2 = 2\pi n_2 = 2\pi n_1 (1 - s) \text{ rad/sec},$$

siis momendi M korral mootori võllil rootori poolt arendatav mehaaniline võimsus

$$P_m = M\Omega_2. \tag{25-28}$$

Võimsuste P_{em} ja P_m vahe kujutab vastavalt seosele (25-22) vaseskadu rootori mähises p_{v2}, kuna rootorit läbiva magnetvoo Φ väikese sageduse tõttu ($f_2 \approx 0{,}5 \ldots 3$ Hz nimikoormusel) võib rauaskao rootori aktiivrauas arvestamata jätta. Seega valemite (25-27) ja (25-28) põhjal saame:

$$p_{v2} = P_{em} - P_m = M(\Omega_1 - \Omega_2) = M\Omega_1 \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = M\Omega_1 \cdot s = P_{em} \cdot s, \tag{25-29}$$

kus

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

on asünkroonmasina libistus.

Seosest (25-28) saame:

$$P_m = (1 - s) P_{em} \tag{25-30}$$

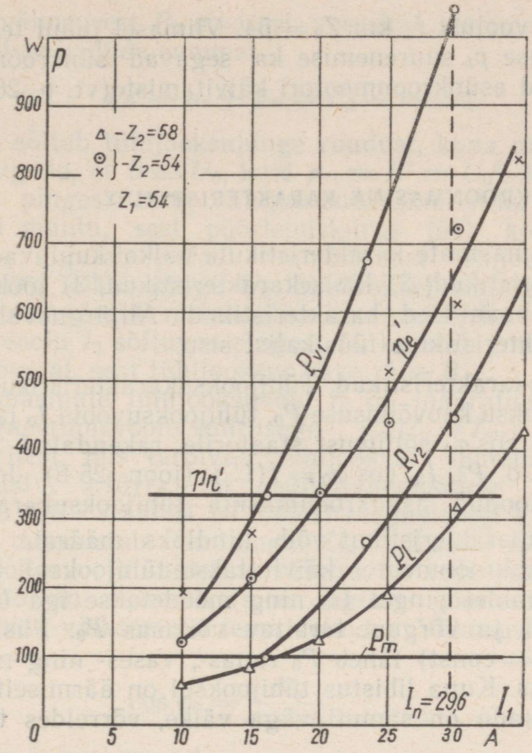
ehk

$$P_m = \frac{1 - s}{s} p_{v2}, \tag{25-31}$$

sest seose (25-29) põhjal

$$P_{em} = \frac{p_{v2}}{s}.$$

Nagu selgub avaldisest (25-29), on asünkroonmasina rootori vaseskadu võrdeline libistusega. Mida suurem on libistus, seda suurema osa elektromagnetilisest võimsusest kaotame nende kadude näol. Seega mootoritel, mille libistus on nimikoormusel väiksem, on üldiselt ka suurem kasutegur.



Joon. 25-5. Asünkroonmasina A71-6 kaovõimsuste sõltuvus koormusvoolust I_1

Libistuse protsentuaalne väärtus $s\% = 100s$ on normaalsetel asünkroonmasinatel võimsusega 1 ... 1000 kW 1 ... 6% piirides (suuremad väärtused vastavad väiksema võimsusega masinatele); võimsustel $P > 1000$ kW on $s < 1\%$. Seega läheb õhupiluvõimsusest 1 ... 6% kaduma rootori mähises tekkiva vaseskaona, suurem osa aga, 94 ... 99% muundub mehaaniliseks võimsuseks.

Et saada ettekujutust üksikute kaoliikide suurusest asünkroonmasinates, toome allpool nende protsentuaalsed väärtused primaarvõimsuse suhtes masinatele võimsusega kuni 100 kW: $p_r = 2 \ldots 4\%$, $p_m \approx 1\%$, $p_{v1} = 5 \ldots 7\%$, $p_{v2} = 3 \ldots 6\%$, $p_l = 1 \ldots 3\%$.

Joonisel 25-5 on toodud üksikute kaoliikide sõltuvus staatori voolust I_1 lühisrootoriga asünkroonmasinal A71-6, mille staatori uurete arv $Z_1 = 54$ ja rootori uurete arv $Z_2 = 58$. Üksikute kaovõimsuste väärtused erinevatel staatori vooludel I_1 on saadud katseliselt. Selleks et näidata rootori ebaõige uurete arvu valiku mõju lisakaovõimsusele p_l, on joonisel 25-5 toodud selle võimsuse p_l' sõl-

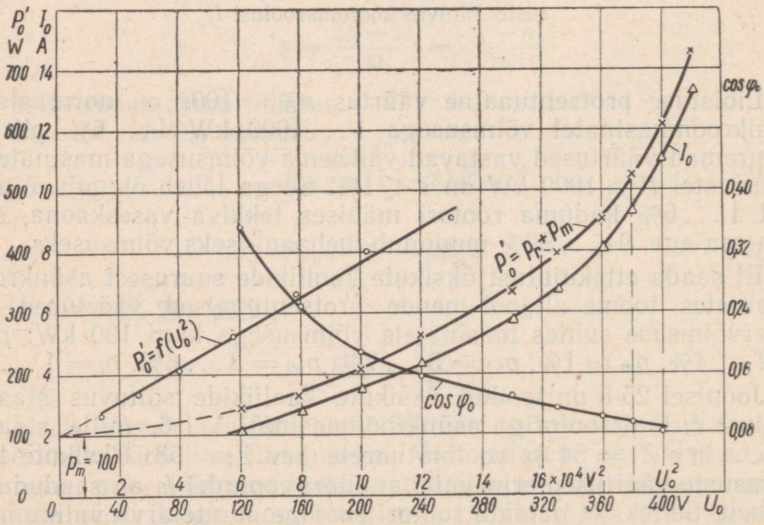
tuvus rootori voolust I_1 kui $Z_2 = 54$. Viimasel juhul tekivad peale lisakaovõimsuse p_l suurenemise ka segavad sünkroonmomendid, mis takistavad asünkroonmootori käivitamist (vt. p. 26-4).

25-7. ASÜNKROONMASINA KARAKTERISTIKUD

Asünkroonmasinate karakteristikute hulka kuuluvad: 1) tühijooksukarakteristikud, 2) lühisekarakteristikud, 3) töökarakteristikud ja 4) mehaanilised karakteristikud. Alljärgnevalt vaatleme üksikute karakteristikute füüsikalist sisu.

Tühijooksukarakteristikud. Tühijooksukarakteristikute all mõistetakse tühijooksu kaovõimsuse P_0, tühijooksuvoolu I_0 ja tühijooksu võimsusteguri $\cos\varphi_0$ sõltuvust staatorile rakendatud pingest U_0 tühijooksul, s. o. P_0, I_0, $\cos\varphi_0 = f(U_0)$ (joon. 25-6). Joonisel 25-6 on näitena toodud asünkroonmasina tühijooksukarakteristikud.

Tühijooksukarakteristikut võib kindlaks määrata katseliselt. Seejuures asünkroonmootor käivitatakse tühijooksul, muudetakse staatori klemmidel pinget U_0 ning mõõdetakse iga U_0 väärtuse juures vool I_0 ja võrgust tarbitav võimsus P_0. Püsival võrgusagedusel ($f_1 = \text{const}$) läheb P_0 rauas-, vases- ning mehaaniliste kadude katteks. Kuna libistus tühijooksul on äärmiselt väike, siis rootori vaseskadu on samuti väga väike, võrreldes teiste kadudega.



Joon. 25-6. Asünkroonmasina A71-6 tühijooksukarakteristik

Eraldades võimsusest P_0 staatori vaseskao, leiame rauaskao ning mehaaniliste kadude summa:

$$P_0' = p_r + p_m = P_0 - mI_0^2 r_1. \qquad (25\text{-}32)$$

Rauaskadu sõltub tühijooksupinge ruudust, kuna masina tühijooksul võib lugeda, et $B \equiv U_0$, kuid $p_{r1} \equiv B^2 \equiv U_0^2$. Mehaaniline kadu ei olene pingest ning tühijooksukarakteristiku katselisel määramisel ei muutu, sest pöörlemiskiirus jääb konstantseks. Seega $p_r + p_m$ kujutab endast ruutsõltuvust tühijooksupingest (joon. 25-6) ning lõikab pinge U_0 lähenemisel nullile ordinaattelge punktis, mis võrdub mehaanilise kao suurusele.

Tühijooksuvoolu I_0 sõltuvus pingest U_0 kujutab endast masina magneetimiskõverat, sest tühijooksul $U_0 \equiv \Phi \equiv B$.

Asünkroonmasinate tühijooksuvool I_0 on määratud peamiselt reaktiivse magneetimisvoolu suurusega I_{mr} ($I_0 \approx I_{mr}$). Erinevalt transformaatoritest, mis tarbivad tühijooksul suhteliselt nõrka voolu $I_0 = (0{,}03 \ldots 0{,}10) I_n$, on asünkroonmasinate tühijooksuvool I_0 õhupilu tõttu staatori ja rootori magnetringi vahel suhteliselt suur ja moodustab nimipingel U_n ligikaudu $I_0 = (0{,}25 \ldots 0{,}50) I_n$. Tühijooksuvoolu suhteline väärtus on seda suurem, mida enam pooluseid on masinal (s. o. aeglase pöörlemiskiirusega masinad) ja mida väiksem on tema võimsus. Võimsusteguriks on suhe

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 U_0 I_0},$$

kus U_0 ja I_0 on faasisuurused.

Nimipingel $\cos \varphi_0 = 0{,}1 \ldots 0{,}25$, sõltudes peamiselt mehaanilistest kadude suurusest.

Masina takistus tühijooksul

$$z_0 = \frac{U_0}{I_0} \qquad (25\text{-}33)$$

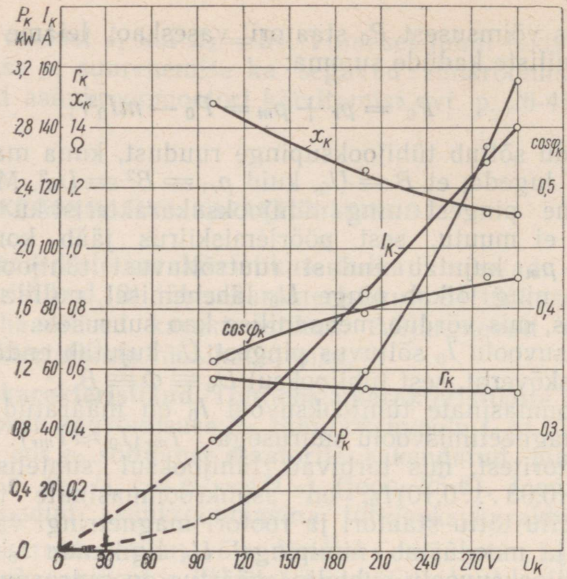
on aseskeemi takistuste z_1 ja z_m summa:

$$z_0 = z_1 + z_m. \qquad (25\text{-}34)$$

Takistus z_m oleneb südamike küllastusest ning seetõttu pinge tõusmisel z_0 väärtus väheneb.

Lühisekarakteristikud. Lühisekarakteristikud kujutavad lühiskao P_k, lühisvoolu I_k ja lühise võimsusteguri $\cos \varphi_k$ sõltuvust lühispingest U_k, s. o. kõveraid P_k, I_k $\cos \varphi_k = f(U_k)$ (vt. joon. 25-7).

Lühisekarakteristiku katselisel määramisel masina rootor pidurdatakse nii, et ta ei saa pöörelda, faasirootori mähise puhul see lühistatakse ning staatori mähist toidetakse tunduvalt madalama pingega U_k (5 ... 25% nimipingest) seepärast, et voolud ei kujuneks ohtlikult suureks. Kogu katse vältel on sagedus



Joon. 25-7. Asünkroonmasina A71-4 lühisekarakteristikud ja parameetrid

$f_1 = \text{const}$. Mitmesuguste pinge U_k väärtuste juures mõõdetakse staatori vool I_k ning võrgust tarbitav võimsus P_k. Allpool tähistavad U_k ja I_k faasisuurusi.

Lühisekatse järgi määratakse ka asünkroonmasina parameetrid: lühise näivtakistuse

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}, \tag{25-35}$$

lühise aktiivtakistuse

$$r_k = \frac{P_k}{m I_k^2} \tag{25-36}$$

ning lühise induktiivtakistuse

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \tag{25-37}$$

sõltuvused lühisvoolust I_k.

Ligikaudu

$$x_k \approx x_1 + x_2' \text{ ja } r_k = r_1 + r_2'. \tag{25-38}$$

Kui tühijooksukarakteristikud iseloomustavad põhiliselt masina magnetahelat, siis lühisekatse määrab peamiselt kindlaks mähistega seotud parameetrid.

Lühiskao P_k moodustab peamiselt vaseskadu staatori ja rootori mähistes, s. o.:

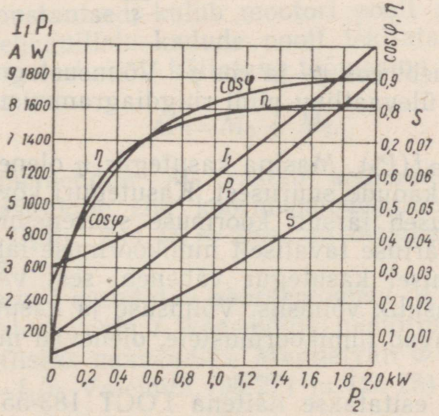
$$P_k = p_{v1} + p_{v2} = m_1 I_1^2 r_1 + m_2 I_2^2 r_2,$$

sest lühisel võib rauaskao tema väiksuse tõttu arvestamata jätta.

Võimsate faasirootoriga asünkroonmasinate puhul on harilikult $z_k \approx$ const. Väiksema võimsusega (kuni 100 kW) lühisrootoriga asünkroonmasinate puhul $z_k \neq$ const, vaid sõltub voolust I_k, mistõttu ka $U_k = f(I_k)$ kaotab oma lineaarse sõltuvuse. Lühise näivtakistuse z_k muutumine on tingitud sellest, et x_k sõltub voolust I_k. Viimane nähtus esineb kinniste ja poolkinniste uurete korral ja füüsikaliselt võib seda seletada järgmiselt. Uurde puistevoog, läbides kinniste või poolkinniste uurete korral uuret pealtpoolt katvaid väikese ristlõikega osi, nn. «sillakesi», kutsub neis esile suure väljatiheduse, mistõttu «sillakesed» küllastuvad. Küllastumise aste oleneb puistevoo, seega ka voolu suurusest. Uurde «sillakeste» küllastumisega suureneb aga järk-järgult puistevoo magnetiline takistus, sest suurtel väljatiheduse väärtustel raua magnetiline läbitavus μ väheneb. Selle tulemusena x_k voolu tugevnemisel loomulikult väheneb.

Koormuskarakteristikud. Asünkroonmasina koormuskarakteristikute all mõistetakse 1) pöörlemiskiiruse n või libistuse s, 2) momendi M, 3) primaarvoolu I_1, 4) võimsusteguri $\cos\varphi$ ja 5) kasuteguri η sõltuvust kasulikust võimsusest P_2 võllil juhul, kui $U_1 = \text{const}$ ja $f = \text{const}$. Joonisel 25-8 on kujutatud asünkroonmasina koormuskarakteristikud tema töötamisel mootorina.

Allpool vaatleme lühidalt ülalnimetatud karakteristikute füüsikalist sisu.



Joon. 25-8. Asünkroonmasina koormuskarakteristikud

Kiiruskarakteristik $n = f(P_2)$. Seosest (25-29) saame:

$$s = \frac{p_{v2}}{p_{em}}, \qquad (25\text{-}39)$$

s. o. asünkroonmasina libistus oleneb rootori vaseskaovõimsuse ja õhupilu võimsuse suhtest. Asünkroonmasina pöörlemiskiirus on määratud seosega

$$n = n_1(1 - s).$$

Seega tühijooksul, kui $p_{v2} \approx 0$, siis ka $s \approx 0$ ja $n \approx n_1$. Koormuse suurenemisel suureneb s ligikaudu võrdeliselt koormusega P_2 ja omab nimikoormusel suurust 0,01 ... 0,06. Seega kujutab kiiruskarakteristik $n = f(P_2)$ koormuse suurenemisel veidi langevat kõverat ja on sarnane paralleelergutusega alalisvoolumasina kiiruskarakteristikuga.

Sõltuvus $M = f(P_2)$. Kuna $M = P_2/\Omega_2 \sim P_2/n_2$ ja n_2 väheneb võimsuse suurenedes, siis momendi karakteristiku $M = f(P_2)$ tõus suureneb koos võimsuse suurenemisega.

Sõltuvus $\cos\varphi = f(P_2)$. Asünkroonmasin tarbib magnetvälja tekitamiseks võrgust reaktiivset magneetimisvoolu, mistõttu tema $\cos\varphi$ on alati tunduvalt väiksem ühest. Tühijooksul $\cos\varphi$ väärtus ei ületa 0,25, koormuse kasvamisel suureneb $\cos\varphi$ kiiresti, saavutades oma maksimaalse väärtuse nimikoormuse ligidal. Koormuse edasisel kasvamisel suureneb kiiresti libistus s, mistõttu suureneb nurk sekundaarvoolu $I_{2'}$ ja emj. $E_{2'}$ vahel

$$\psi_2 = \operatorname{arc\,tg} \frac{x_{2'}}{\frac{r_{2'}}{s}}$$

ja seega väheneb $\cos\psi_2$ ja $\cos\varphi$. Võimsusteguri muutumisest koormusel saab ülevaatliku pildi ringdiagrammist, mida vaatleme hiljem.

Sõltuvus $\eta = f(P_2)$. Masina kasutegur η oleneb masina töötamisel esinevate kadude suurusest. Kasuteguri kõver, samuti nagu $\cos\varphi$ kõver, tõuseb järsult koormuse suurenemisel ja saavutab maksimaalse väärtuse tavaliselt nimikoormuse lähedal. Koormuse edasisel kasvamisel kasutegur väheneb, sest vaseskadu kasvab kiiremini kui kasulik võimsus. Võimsuse ja kasuteguri nimiväärtused, mis vastavad nimikoormustele, olenevad masina nimivõimsusest.

Tabelis 25-1 esitatakse näitena ГОСТ 183-55 poolt nõutavad kasuteguri ja võimsusteguri väärtused mitmesuguse nimivõimsusega mootorite puhul.

Tabel 25-1

Kaitstud ehitusviisiga asünkroonmootorite võimsusteguri ja kasuteguri väärtused nimikoormusel

Nimi-võim-sus kW	Sünkroonpöörlemiskiirus p/min							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	Kasutegur				Võimsustegur			
1,0	79,0	78,5	77,0	—	0,86	0,79	0,72	—
1,7	81,5	—	—	—	0,87	—	—	—
2,8	84,0	83,5	82,5	—	0,88	0,84	0,78	—
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,86	0,84
75	91,0	91,5	92,0	—	0,91	0,89	0,88	—
100	91,5	—	—	—	0,92	—	—	—

XXVI PEATÜKK

ASÜNKROONMASINA PÖÖRDEMOMENT

26-1. PÖÖRDEMOMENDI ÜLDINE AVALDIS

Asünkroonmasina töötamisel püsivas režiimis, s. o. kui U_1, f_1 ja P_2 on konstantsed, kulub mootori poolt rootoril arendatav moment M mehaaniliste kadude poolt tekitatava tühijooksumomendi M_0 ja mootori poolt käitatava töömasina kasuliku momendi M_2 ületamiseks:

$$M = M_0 + M_2. \tag{26-1}$$

Tühijooksumomendile M_0 vastab mehaanilise kao võimsus $p_m = \Omega_2 M_0$, kasulikule ehk koormusmomendile M_2 aga kasulik võimsus $P_2 = \Omega_2 M_2$, kus $\Omega_2 = 2\pi n_2$ on masina rootori mehaaniline nurkkiirus.

Masina rootoril arendatav pöördemoment M tekitatakse pöördvälja Φ ja rootori voolu I_2 koosmõjul, mistõttu teda nimetatakse elektromagnetiliseks momendiks. Magnetväli Φ pöörleb sünkroonkiirusega $n_1 = f_1/p$. Valemite (25-27) ja (25-25) põhjal

$$\Omega_1 M = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{s}. \tag{26-2}$$

Siin

$$\Omega_1 = 2\pi n_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

on magnetvälja mehaaniline nurkkiirus, ning R_2' kujutab üldjuhul rootori ahela taandatud takistust, mis koosneb rootori mähise taandatud takistuse r_2' ja rootori välisvooluringi lülitatud taandatud lisatakistuse r_l' summast, s. o. $R_2' = r_2' + r_l'$. Takistus r_l' võib esineda faasirootori puhul.

Valemist (26-2) saame elektromagnetilise momendi kohta avaldise

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\Omega_1 s} = \frac{p m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1}. \qquad (26\text{-}3)$$

Lähtudes joonisel 25-2, *b* toodud aseskeemist ja arvesse võttes parandustegurit (vt. valem 25-17), saame taandatud rootorivoolu absoluutväärtuse I_2' avaldada järgmiselt:

$$I_2' = \sigma_1 I_2'' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \sigma_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2}}. \qquad (26\text{-}4)$$

Asetades saadud avaldise valemisse (26-3), saame asünkroonmasina pöördemomendi kohta avaldise

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{R_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \sigma_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2\right]}. \qquad (26\text{-}5)$$

Momendi arvutamisel selle valemi järgi MKSA süsteemi ühikutes saame tulemuse njuuton-meetrites (Nm). Kui tahame tulemust saada kilogramm-meetrites (kgm), tuleb antud avaldis (26-5) jagada arvuga 9,81.

26-2. PÖÖRDEMOMENDI SÕLTUVUS LIBISTUSEST

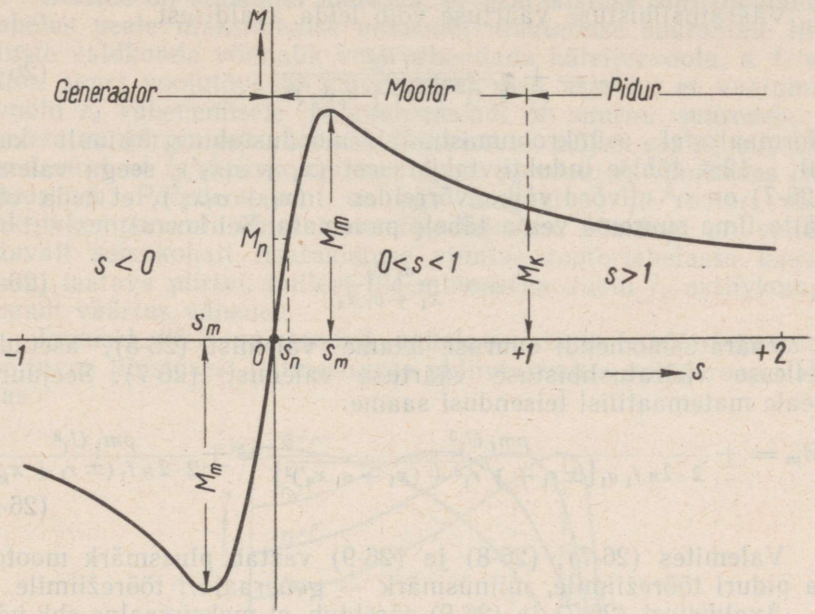
Asünkroonmasinate tööomaduste uurimisel huvitab meid pöördemomendi M muutumine sõltuvalt pöörlemiskiirusest või libistusest, sest pöörlemiskiirus $n = (1 - s)n_1$.

Pöördemomendi M sõltuvust libistusest s kõigil töörežiimidel on võimalik määrata valemi (26-5) põhjal.

Viimasest järeldub, et $M = 0$, kui $s = 0$ ning $s = \pm\infty$, kuna M väärtuse märk ($\pm$) on sama mis s märk. Vastavalt omab kõver $M = f(s)$ $0 < s < +\infty$ piirkonnas maksimumi ning $-\infty < s < 0$

piirkonnas miinimumi. Oluline on tähele panna, et antud libistuse puhul on moment võrdeline pinge ruuduga.

Joonisel 26-1 on toodud momendi kõver $M = f(s)$, kui $U_1 = \text{const}$ ja $f_1 = \text{const}$ piduri, mootori ja generaatori töörežiimidele.



Joon. 26-1. Asünkroonmasina pöördemomendi sõltuvus libistusest

Vaatame lähemalt momendi kõverat mootori töörežiimis, mis esineb asünkroonmasina puhul kõige sagedamini.

Asünkroonmootori lülitamisel konstantse pinge ja sagedusega elektrivõrku arendab viimane käivitusmomenti, mille suuruse leiame valemist (26-5), asetades viimasesse $s = +1$:

$$M_k = \frac{p m_1 U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + \sigma_1 R_2')^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2]}. \qquad (26\text{-}6)$$

Normaalsed lühisrootoriga asünkroonmootorid omavad suhteliselt väikest käivitusmomenti, mis ei ületa palju nimimomenti ($M_k \approx 1{,}2 M_n$).

Kui käivitusmoment M_k on suurem kui masina pöörlemist takistav staatiline moment M_{st}, siis asünkroonmootor hakkab pöörlema, suurendades pidevalt kiirust. Seejuures suureneb pöördemoment aeglaselt koos pöörlemiskiiruse kasvuga kuni maksi-

maalse väärtuseni M_m, nn. *vääratusmomendini*. Libistust $s = s_m$, mille juures esineb vääratusmoment, nimetatakse *kriitiliseks* ehk *vääratuslibistuseks*.

Nimipingel esineva vääratusmomendi M_m suhet nimipöördemomendiga M_n nimetatakse *ülekoormatavuseks* ja tema suurus on tavaliselt $M_m/M_n = 1{,}6 \ldots 2{,}5$.

Vääratuslibistuse väärtuse võib leida avaldisest

$$s_m = \pm \frac{\sigma_1 R_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2}}. \qquad (26\text{-}7)$$

Normaalsetel asünkroonmasinatel moodustab r_1 ainult kuni 10 ... 12% lühise induktiivtakistusest $(x_1 + \sigma_1 x_2')$, seega valemis (26-7) on r_1^2 niivõrd väike, võrreldes $(x_1 + \sigma_1 x_2')$, et teda võib jätta ilma suurema veata tähele panemata. Sel korral

$$s_m \approx \frac{\sigma_1 R_2'}{x_1 + \sigma_1 x_2'}. \qquad (26\text{-}8)$$

Vääratusmomendi suuruse leiame valemist (26-5), asetades sellesse vääratuslibistuse väärtuse valemist (26-7). Seejuures peale matemaatilisi teisendusi saame:

$$M_m = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2 \cdot 2\pi f_1 \sigma_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2}]} \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2 \cdot 2\pi f_1 (\pm r_1 + x_k)}. \qquad (26\text{-}9)$$

Valemites (26-7), (26-8) ja (26-9) vastab plussmärk mootori ja piduri töörežiimile, miinusmärk — generaatori töörežiimile.

Avaldistest (26-7) ja (26-9) järeldub, et maksimaalne ehk vääratusmoment

1) ei sõltu rootori ahela aktiivtakistusest;

2) esineb seda suurema libistuse juures, mida suurem on rootori ahela aktiivtakistus R_2' ja mida väiksemad on puistetakistused x_1 ja x_2';

3) on võrdeline staatori pinge ruuduga;

4) on seda väiksem, mida suuremad on lühise induktiivtakistused $x_k = x_1 + \delta_1 x_2'$, s. o. mida suuremad on masina puistetakistused;

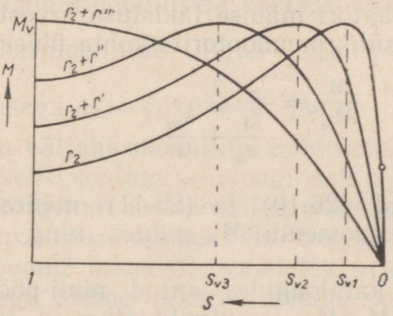
5) on generaatorirežiimis üldiselt veidi suurem kui mootorirežiimis (joon. 26-1).

Vääratuslibistuse väärtus on normaalsetel asünkroonmasinatel $s_m = 0{,}08 \ldots 0{,}2$, kusjuures suuremad väärtused vastavad väiksema võimsusega masinatele. Nagu on näha valemist (26-8), on faasirootoriga asünkroonmootori korral lisatakistuse abil rootori välisvooluringis võimalik suurendada vääratuslibistuse suurust. Viimast asjaolu kasutatakse faasirootoriga asünkroonmootori käivitamisel, kui käivitustingimuste seisukohalt on vaja suurendada käivitusmomenti (vt. ptk. XXVIII). Juhul kui nõutakse käivitust

maksimaalse momendiga $M_k = M_m$, siis tuleb selleks rootoriahela aktiivtakistus teha võrdseks lühise induktiivtakistusega, s. o. $R_2' \approx x_1 + x_2'$. Rootoriahela aktiivtakistuse muutmisel muutub küll vääratuslibistuse suurus, kuid ei muutu vääratusmomendi suurus ja üldine kõvera kuju.

Oluline on siinkohal märkida, et lisatakistuse abil on rootoriahelas peale maksimaalse momendi nihutamise suuremate libistuste valdkonda võimalik veel vähendada käivitusvoolu, s. t. vältida suuri voolutõukeid käivitamisel. See asjaolu, et vaatamata voolu I_2 vähenemisele pöördemomendi M suurus suureneb, on seletatav järgmiselt. Lisa-aktiivtakistuse mõjul $\cos \psi_2$ suureneb sedavõrd, et I_2 aktiivkomponent $I_2 \cos \psi_2$ voolu I_2 vähenedes isegi suureneb. Pöördemoment on aga magnetvoo ja rootori voolu aktiivkomponendi ühise koosmõju tulemus. Muidugi on vaadeldavalt seisukohalt lisatakistuse viimine rootoriahelasse kasulik kuni teatava piirini, millest üle minnes ka voolu I_2 aktiivkomponendi väärtus väheneb.

Joonisel 26-2 on toodud asünkroonmootori pöördemomendi sõltuvus libistusest mitmesuguse aktiivtakistuse puhul rootoriahelas.



Joon. 26-2. Asünkroonmootori pöördemomendi sõltuvus libistusest mitmesuguse aktiivtakistuse puhul rootoriahelas

Mootori käivituse lõpp-perioodil, kui $s < s_m$, väheneb momendi M väärtus kuni $M = M_{st}$, s. t. kuni saavutatakse tasakaal mootori poolt arendatava pöördmomendi M ja takistusmomendi M_{st} vahel.

Joonistelt 26-1 ja 26-2 selgub, et väikestel libistustel $0 \leqslant s < s_n$, mis vastab asünkroonmootori tööolukorrale, on pöördemomendi kulg peaaegu sirgjooneline ja sarnaneb alalisvoolu-haruvoolumootori momendikarakteristikuga. Niisugust pöördemomendi karakteristiku kulgu nimetatakse jäigaks.

26-3. SUHTELISE PÖÖRDEMOMENDI AVALDIS. KLOSSI VALEM

Praktikas on sageli vaja arvutada pöördemomendi kõver $M = f(s)$ kataloogi või käsiraamatu andmete järgi, mispuhul on antud väratusmomendi ja vääratuslibistuse andmed. Kui vääratuslibistus pole otseselt antud, saame seda arvutada valemi (26-8) põhjal masina parameetrite järgi. Toome avaldise, mis seob suurused M, s, M_m ja s_m. Kui on antud vääratusmomendi M_m ja vääratuslibistuse s_m suurused, saame arvutada pöördemomendi M suuruse mingil etteantud libistusel s.

Valemite (26-5) ja (26-9) põhjal saame mootorirežiimi kohta seose

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2(1+g)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2g}, \tag{26-10}$$

kus $g = \frac{r_1}{\sigma_1 R_2'} s_m$.

Kui lisatakistus rootori ahelas puudub, võib võtta $g \approx s_m$, sest tavaliselt $r_2' \approx r_1$.

Kui loobuda staatori mähise takistuse arvestamisest ($r_1 = 0$), siis saame kõigi asünkroonmootorite kohta ühise avaldise:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}. \tag{26-11}$$

Toodud valemid (26-10) ja (26-11) määravad momendi M väärtused vääratusmomendi M_m suhtes ning neid nimetatakse Klossi valemiteks.

Tavaliselt on kataloogides antud nimi-pöördemomendi M_n, ülekoormatavuse M_m/M_n ja nimilibistuse s_n väärtused. Seega saame valemi (26-10) põhjal määrata vääratuslibistuse s_m väärtuse. Teades M_m ja s_m väärtusi ja andes ette vabalt libistuse s suurusi, võime arvutada avaldiste (26-10) ja (26-11) järgi vastavad pöördemomendi väärtused.

26-4. KÕRGEMATE VÄLJAHARMOONILISTE MÕJU ASÜNKROONMASINA PÖÖRDEMOMENDI KÕVERALE

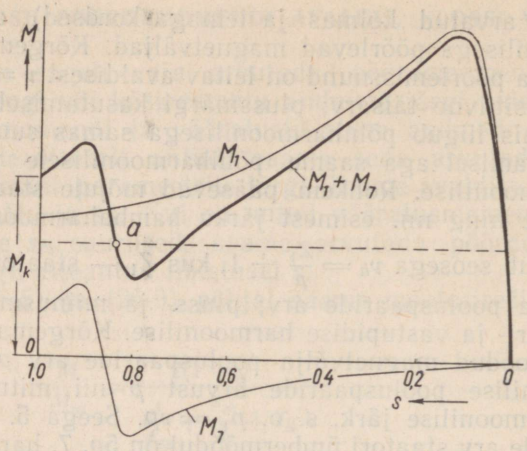
Nagu nägime eespool (ptk. XXIII), sisaldab kolmefaasilise asünkroonmasina magnetväli peale põhiharmoonilise veel kõrgemaid harmoonilisi. Selleks et lähemalt selgitada viimaste mõju pöördemomendi kõverale, tuletame siinkohal lühidalt meelde kõrgemate harmooniliste põhilised omadused.

Kolmefaasilises masinas tekitavad mmj. kõrgemad harmooni-

lised (välja arvatud kolmas ja temaga kordsed) analoogiliselt põhiharmoonilisega pöörlevad magnetväljad. Kõrgemate harmooniliste järk ja pöörlemissuund on leitav avaldisest $\nu = 6k \pm 1$, kus k — iga positiivne täisarv; plussmärgi kasutamisel saame harmoonilise, mis liigub põhiharmoonilisega samas suunas, miinusmärgi kasutamisel aga saame põhiharmoonilisele vastassuunas liikuva harmoonilise. Rohkem pääsevad mõjule staatori 5. ja 7. harmooniline ning nn. esimest järku hambaharmoonilised, mille järk väljendub seosega $\nu_h = \frac{Z_1}{p} \pm 1$, kus Z_1 — staatori uurete arv, p — masina pooluspaaride arv; pluss- ja miinusmärk annavad vastavalt päri- ja vastupidise harmoonilise. Kõrgemate harmooniliste poolt loodud magnetvälja pooluspaaride arv p_ν on suurem põhiharmoonilise pooluspaaride arvust p nii mitu korda, kui suur on harmoonilise järk, s. o. $p_\nu = \nu p$. Seega 5. harmoonilise pooluspaaride arv staatori ümbermõõdul on $5p$, 7. harmoonilisel — $7p$ jne. Kuid harmooniliste pöörlemiskiirus teda tekitava mähise suhtes on väiksem põhiharmoonilise pöörlemiskiirusest $n_1 = f_1/p$ harmoonilise järgu kordselt; s. o. $n_\nu = f_1/\nu p = \frac{n_1}{\nu}$. Seega 5. harmooniline liigub põhiharmoonilisele vastassuunas kiirusega $n_5 = f/5p = \frac{n_1}{5}$, 7. harmooniline liigub aga põhiharmoonilisega samas suunas kiirusega $n_7 = f_1/7p = \frac{n_1}{7}$ jne.

Staatori kõrgem väljaharmooniline indutseerib rootoris voolud ning tekitab koos selle vooluga analoogiliselt põhiharmoonilisega momendi. Sellist kõrgema harmoonilise poolt tekitatud momenti nimetatakse asünkroonseks momendiks. Seejuures võib iga harmoonilise poolt loodud momenti vaadelda eraldi rakendatuna masina võllile. Seega üldine moment masina võllil luuakse magnetvälja põhiharmoonilise ja kõrgemate harmooniliste poolt tekitatud momentide summana. Põhiharmoonilise poolt loodud momendi sõltuvust libistusest vaatlesime eespool. Uurime siin kõrgema, nimelt 7. harmoonilise poolt tekitatud momendi sõltuvust masina pöörlemiskiirusest.

Kuna 7. harmoonilise pöördväli liigub põhiharmoonilisega samas suunas, siis masina käivitamisel 7. harmooniline tekitab põhiharmoonilisega (M_1) samasuunalise momendi (M_7) (joon. 26-3). Üldine momendi kõvera M_7 käik on analoogiline põhiharmoonilise momendi M_1 käiguga. Seega rootori pöörlemiskiiruse suurenemisel suureneb kõrgema harmoonilise moment, saavutab teataval kiirusel maksimaalse väärtuse ning muutub nulliks kiirusel $\frac{n_1}{7}$, mil rootor pöörleb sünkroonselt 7. harmoonilisega ning seega 7. harmoonilise poolt rootoris mingit emj. ega ka voolu ei



Joon. 26-3. Asünkroonmootori pöördemomendi sõltuvus libistusest kõrgemate harmooniliste mõju arvestamisel

tekitata. Edasisel masina pöörlemiskiiruse kasvamisel saab rootori pöörlemiskiirus suuremaks kui 7. harmoonilise pöörlemiskiirus ning järelikult asub masin selle harmoonilise suhtes generaatori töörežiimi, s. t. 7. harmoonilise moment läheb põhiharmoonilise momendiga võrreldes vastupidiseks ning hakkab rootorit pidurdama.

Liites põhiharmoonilise ja 7. harmoonilise poolt tekitatud momendid, selgub, et kiiruse $\frac{n_1}{7}$ ligidal tekib resulteeriva momendi kõveras järsk momendi langus. Kui seejuures resulteeriva momendi $M_1 + M_7$ minimaalne väärtus osutub väiksemaks kui staatilise pidurdava momendi suurus võllil (punktiirjoon joonisel 26-3), siis mootor jääb töötama kiirusel, mis moodustab umbes $\frac{1}{7}$ masina nimikiirusest (punkt *a*).

Analoogiliselt tekitavad vastassuunas pöörlevad harmoonilised ($\nu = 5, 11 \ldots$) pöördemomendid, mis kutsuvad esile resulteeriva momendi langused pidurirežiimis ($s > 1$).

Vaadeldavad kõrgemate harmooniliste asünkroonmomendid on faasirootoriga mootorite puhul tähtsusetud, kuid võivad kujuneda üsna olulisteks lühisrootoriga mootorites, sest viimastes võivad staatori kõrgemate harmooniliste poolt indutseeritud voolud kujuneda üsna suurteks. Selline olukord tekib näiteks juhul, kui lühisrootori naabervarraste kaugus on lähedane kõrgema harmoonilise poolusejaotusele $\tau_\nu = \frac{\tau}{\nu}$, sest siis moodustavad kaks naabervar-

rast äärmiselt väikese takistusega vooluahela, kus kõrgema harmoonilise elektromotoorsed jõud liituvad aritmeetiliselt.

Eriti ohtlikud on nn. hambaharmoonilised (vt. ptk. XXI ja XXIII), sest nende jaoks on mähisetegur sama suur nagu esimesele harmoonilisele.

Selleks et vähendada kõrgemate harmooniliste asünkroonsete momentide kahjulikku mõju, kasutatakse järgmisi abinõusid: 1) staatori mähisel valitakse $q > 1$, et suurendada hambaharmooniliste järjekorranumbrit ja sellega vähendada nende amplituude, ja kasutatakse mähistel lühendatud sammu, et vähendada teiste harmooniliste osatähtsust; 2) staatori ja rootori uurete arvud Z_1 ja Z_2 valitakse selliselt, et asünkroonmomentide mõju oleks viidud miinimumini (tavaliselt $0{,}5\ Z_1 < Z_2 < 1{,}25\ Z_1$); 3) rootori uurded kallutatakse staatori uurete suhtes staatori ühe uurdejaotuse võrra.

Peale staatori kõrgemate harmooniliste ja nende poolt tekitatud rootori harmooniliste koosmõju, mille tulemusel tekivad asünkroonsed momendid, võivad aset leida juhud, mil rootori magnetvälja harmooniline omab sama pooluspaaride arvu mingi sellise staatori välja harmoonilisega, mis ei ole vaadeldava rootori harmoonilise tekkimise põhjustajaks. Kui nende harmooniliste magnetväljad mingil rootori kiirusel liiguvad ruumis sünkroonselt, siis tekib nende koostegevusel püsiv moment — analoogiliselt sünkroonmasinaga. Sellist kõrgemate harmooniliste poolt tekitatud momenti nimetatakse oma iseloomu järgi sünkroonseks. See võib asünkroonmasina põhimomendile kas liituda või temast lahutuda, olenevalt sellest, milline on vaadeldavate harmooniliste magnetväljade või nende pooluste vastastikune ruumiline asend.

Kui rootori pöörlemiskiirus muutub, siis need staatori ja rootori väljad liiguvad üksteise suhtes (langevad välja sünkronismist) ja nende koostegevusel loodud moment hakkab võnkuma positiivse ja negatiivse väärtuse vahel, moodustades keskmiselt nullväärtusega momendi, mis masina tööd enam oluliselt ei mõjusta, kui mitte arvestada vibratsiooni ja sellega kaasuva müra tekkimise võimalust.

Juhul kui $Z_1 = Z_2$, tekivad sünkroonsed momendid käivituse alghetkel ($s = 1$) ning on eriti suured, nii et rootor ei saa üldse hakata pöörlema.

Sünkroonseid momente võib peaaegu täiesti vältida rootori uurete kallutamisega ühe staatori uurdejaotuse võrra ning staatori ja rootori uurete arvude õige valikuga. Seejuures tuleb eriti vältida uurete arvude vahekorda $Z_2 = Z_1$ ja $Z_2 = Z_1 \pm 2p$.

ASÜNKROONMASINA RINGDIAGRAMM

27-1. ASÜNKROONMASINA RINGDIAGRAMMI KOOSTAMINE

Ringdiagrammi olemus ja kasutamine. Asünkroonmasina ringdiagrammiks nimetatakse primaarvoolu ringikujulist kohakõverat komplekstasandis, s. o. kõverat, mida mööda liigub primaarvoolu vektori ots konstantse primaarpinge ning sageduse ja muutuva libistuse, s. o. muutuva koormuse puhul. Ringikujuline voolu kohakõver esineb asünkroonmasinatel, mille parameetrid (induktiiv- ja aktiivtakistused x_1, x_2, r_1, r_2, x_m, r_m) ei muutu koormuse muutumisel.

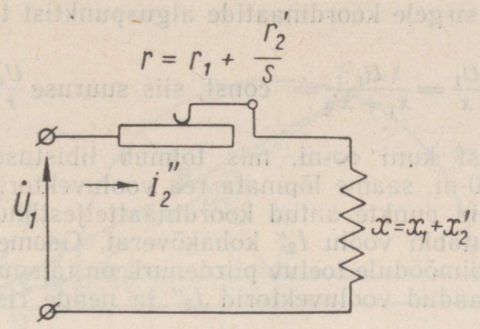
Ringdiagrammi abil on võimalik kergesti saada ülevaadet masina omadustest.

Asünkroonmasina tööomaduste määramisel on vaja teada masina koormuskarakteristikuid, mis kujutavad sõltuvusi M, $\cos\varphi$, η, $s = f(P_2)$ (vt. p. 25-7). Koormuskarakteristikuid on võimalik üles võtta katselisel teel. Kuid sageli on masina otsene katsetamine võimatu katseseadmete puudumise tõttu (eriti suure võimsusega masinate korral). Sel puhul on võimalik masina koormuskarakteristikuid määrata ringdiagrammist kaudsete katsete alusel, milleks on asünkroonmasina tühijooksu- ja lühisekatse. Samuti on ringdiagrammi võimalik koostada masina arvutusandmete alusel, mis võimaldab masina projekteerimisel eelnevalt kindlaks määrata meid huvitavad karakteristikud ja suurused ning kontrollida nende vastavust riiklikele normidele.

Asünkroonmasina ringdiagrammi põhjal saadud normaalsete asünkroonmasinate koormuskarakteristikud erinevad tavaliselt vähe katseliselt saadud karakteristikutest, mistõttu ringdiagrammi võib lugeda tema praktilisel kasutamisel piisavalt täpseks.

Ringdiagrammi olemasolu tõestasid esimestena iseseisvalt Heyland ja Berend 1894.—1896. a. Hiljem anti Osanna, La Cour'i jt. poolt alused täpsele ringdiagrammile, mis põhineb asünkroonmasina aseskeemil (joon. 25-2, *a*). Nõukogude Liidus on laialdast kasutamist leidnud ringdiagramm joonisel 25-2, *b* kujutatud aseskeemile, mille alused on välja töötatud akadeemik M. Kostenko poolt. Allpool vaatame niisuguse ringdiagrammi tõestuse aluseid.

Sekundaarvoolu I_2'' ring. Asünkroonmasina aseskeemi (joon. 25-2, *b*) kohaselt koosneb peamine vooluahel I_2'' püsivast induktiivtakistusest $x = x_1 + x_2'$ ja muutuvast aktiivtakistusest $r = r_1 + \frac{r_2'}{s}$, mis libistuse s muutumisel 0-st kuni ∞-ni muutub ∞-st kuni r_1-ni. Toodud vooluahelat toidetakse püsiva klemmipingega U_1. Seega sekundaarvoolu I_2'' kohakõvera uurimisel lähtume lihtsaimast aseskeemist, mis on toodud joonisel 27-1. Olgu



Joon. 27-1. Asünkroonmasina peavooluahela lihtsustatud aseskeem

meil teada pinge U_1 ja voolu I_2'' absoluutväärtused ning nende vaheline nurk φ_2. Kanname joonisel 27-2 vertikaalsuunas pingevektori U_1 ja temast nurga φ_2 võrra nihutatud vooluvektori I_2''. Läbi vooluvektori I_2'' otsa joonestame viimasele punktis B ristsirge ja pikendame seda kuni lõikumiseni ordinaatteljega punktis A ja abstsissteljega punktis C. Tekkinud lõigud OA ja OC on võrdelised suurustega

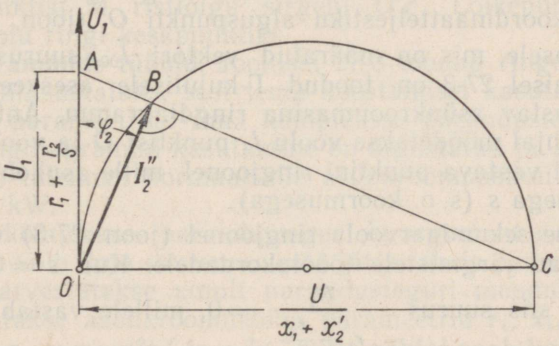
$$OA \equiv \frac{I_2''}{\cos\varphi_2} = I_2'' \frac{z}{r} = \frac{U_1}{r}, \quad OC \equiv \frac{I_2''}{\sin\varphi_2} = I_2'' \frac{z}{x} = \frac{U_1}{x},$$

kus $r = r_1 + \frac{r_2'}{s}$, $x = x_1 + x_2'$,

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2},$$

$$I_2'' z = U_1.$$

Seega kui kanda ordinaatteljele lõik OA ja abstsissteljele lõik OC ning ühendada need lõigud sirgjoonega, siis on vooluvekto-



Joon. 27-2. Sekundaarvoolu I_2'' kohakõver

riks I_2'' sellele sirgele koordinaatide alguspunktist tõmmatud ristlõik.

Kuna suhe $\frac{U_1}{x} = \frac{U_1}{x_1 + x'_2} =$ const, siis suuruse $\frac{U_1}{r} = \frac{U_1}{r_1 + \frac{r'_2}{s}}$ muutumisel 0-st kuni ∞-ni, mis toimub libistuse s muutumisel ∞-st kuni 0-ni, saame lõpmata rea vooluvektori I_2'' otsa asukohta määravaid punkte antud koordinaatteljestikus, mida ühendav kõver kujutabki voolu I_2'' kohakõverat. Geomeetriast teame, et ringjoone läbimõõdule toetuv piirdenurk on täisnurk. Kuna ülaltoodud viisil saadud vooluvektorid I_2'' ja nende ristsirged toetuvad lõigule $\frac{U_1}{x}$, siis järelikult vooluvektori I_2'' kohakõver on ringjoon, mille läbimõõt

$$D = \frac{U_1}{x_1 + x_2'}. \tag{27-1}$$

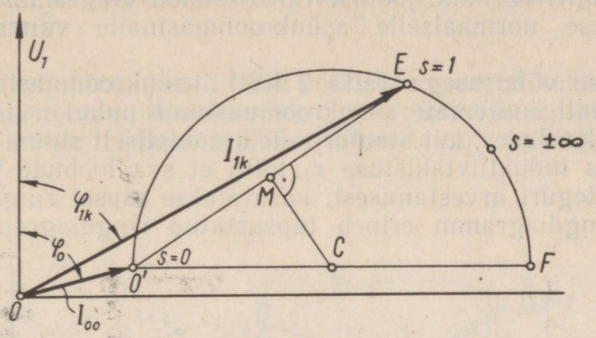
Ringdiagrammi läbimõõt on järelikult seda suurem, mida väiksem on masina takistus $x_k = x_1 + x_2'$ ning ei olene masina aktiivtakistusest.

Primaarvoolu I_1 kohakõver. Asünkroonmasina korral huvitab meid täielik ringdiagramm, millest peale voolu I_2'' võib leida ka primaarvoolu I_1. Vastavalt aseskeemile joonisel 25-2, *b* tuleb viimase määramiseks vektorile I_2'' liita geomeetriliselt voolu I_{00} väärtus. Vektori I_{00} suurus ja suund pinge U_1 suhtes on määratavad seoseist

$$\left.\begin{aligned} I_{00} &= \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2}}, \\ \cos\varphi_{00} &= \frac{r_1 + r_m}{\sqrt{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2}}. \end{aligned}\right\} \tag{27-2}$$

Seega asünkroonmasina täieliku ringdiagrammi saamiseks nihutame koordinaatteljestiku alguspunkti O (joon. 27-2) vasakule kaugusele, mis on määratud vektori I_{00} suurusega (joon. 27-3). Joonisel 27-3 on toodud Γ-kujulisele aseskeemile (joon. 25-2, *b*) vastav asünkroonmasina ringdiagramm. Antud ringdiagrammi põhjal mõõdetakse voolu I_1 punktist O ja voolu I_2'' punktist O' kuni vastava punktini ringjoonel, mille asukoht on määratud libistusega s (s. o. koormusega).

Määrame sekundaarvoolu ringjoonel (joon. 27-3) vooluvektori I_2'' asukohad järgmistele tööolukordadele. Kui $s = 0$ (ideaalne tühijooks), siis suurus $\frac{U_1}{r_1 + \frac{r_2'}{s}} = 0$, millele vastab koordinaatide alguspunkt $0'$. Asünkroonmasina lühisel $s = 1$ ning suurus



Joon. 27-3. Asünkroonmasina lihtsustatud ringdiagramm

$\frac{U_1}{r_1+\frac{r_2'}{s}}=\frac{U_1}{r_1+r_2'}$. Vooluvektori asukoht on määratud nurga φ_{2k} suurusega lühisel

$$\varphi_{2k}=\operatorname{arc\,tg}\frac{x_1+x_2'}{r_1+r_2'}. \tag{27-3}$$

Tavaliselt $x_k > r_k$ ning seega $\varphi_{2k} > 45°$. Libistusel $s=\pm\infty$ on $\frac{r_2'}{s}=0$ ning $\frac{U_1}{r_1+\frac{r_2}{s}}=\frac{U_1}{r_1}$. Seega nurk pinge ja voolu $I''_{2\infty}$ vahel

$$\varphi_{2\infty}=\operatorname{arc\,tg}\frac{x_1+x_2'}{r_1}. \tag{27-4}$$

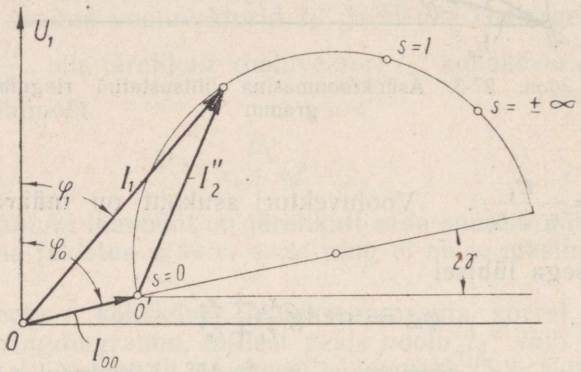
Asünkroonmasina ringdiagrammi koostamine toimub tavaliselt järgmiselt. Tühijooksu- ja lühiseandmete (I_0, cos φ_0 ja I_{1k}, cos φ_{1k}) põhjal leiame ringdiagrammi vastavad punktid O' ja E (joon. 27-3). Ühendame punktid O' ja E sirglõiguga ning joonestame tema keskpunktist M ristlõigu sirgeni $O'F$. Lõikepunkt C on sekundaarvoolu ringi keskpunktiks.

Ringdiagrammide tüübid. Joonisel 27-3 toodud ringdiagrammi nimetatakse lihtsustatuks, sest tema koostamisel kasutame asünkroonmasina parameetreid ilma kompleksse parandustegurita $\dot{\sigma}_1$. Niisuguse ringdiagrammi kasutamine on õigustatud ja annab küllaltki täpseid tulemusi normaalseile asünkroonmasinaile võimsusega üle 100 kW.

Juhul kui kompleksse parandusteguri $\dot{\sigma}_1$ argument γ on niivõrd väike, et selle võib ilma suurema veata jätta tähele panemata (võttes $\gamma=0$), arvestatakse ainult parandusteguri moodulit σ_1. Sel juhul asendatakse asünkroonmasina parameetrid r_1, x_1, r_2' ja x_2' suurustega $\sigma_1 r_1$, $\sigma_1 x_1$, $\sigma_1^2 r_2'$ ja $\sigma_1^2 x_2$, mille põhjal saab koostada nn. täpsustatud ringdiagrammi. Niisugune ringdiagramm on oma ehi-

tuselt kõigiti sarnane joonisel 27-3 toodud diagrammiga ja teda kasutatakse normaalseile asünkroonmasinaile võimsusega üle 2 kW.

Väikese võimsusega (alla 2 kW) asünkroonmasinate puhul ning samuti suuremate asünkroonmasinate puhul nende töötamisel eriolukordades, kui staatori ahela suhteliselt suure aktiivtakistuse r_1 ja induktiivtakistuse x_1 tõttu ei saa loobuda kompleksse parandusteguri arvestamisest, kasutatakse täpset ringdiagrammi. Täpne ringdiagramm erineb täpsustatud ringdiagrammist selle



Joon. 27-4. Asünkroonmasina täpne ringdiagramm

poolest, et tema sekundaarvoolu I_2'' kohakõver on pööratud punkti O' läbiva ja abstsissteljega paralleelse sirgjoone suhtes nurga 2γ võrra (joon. 27-4). Nagu näitab analüüs, on nurga 2γ väärtus leitav seosest

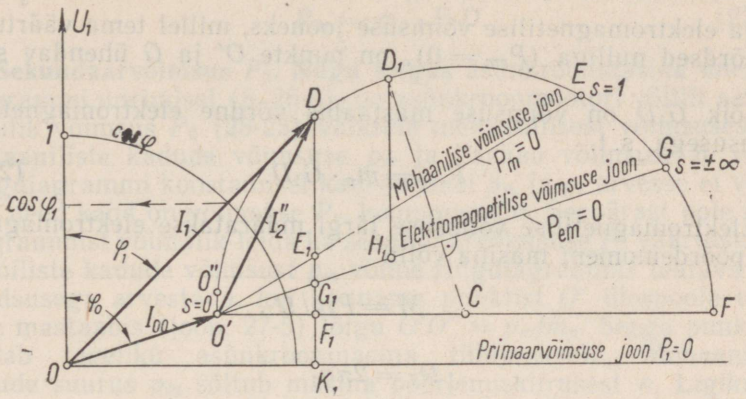
$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{2r_1}{x_1 + x_m} = \frac{2r_1 I_0}{U_1}. \qquad (27\text{-}5)$$

Täpse ringdiagrammi läbimõõt

$$D = \frac{U_1}{x_1 + x_2' \sigma_1 + \frac{r_1^2}{x_m}}.$$

Täpse ringdiagrammi põhjal leitud suurused ühtivad tavaliselt hästi katseandmetega, mistõttu riiklikud normid näevad ette selle ringdiagrammi kasutamist asünkroonmasinaile võimsusega kuni 1000 kW.

Kuna asünkroonmasin leiab praktikas peamist kasutamist mootorina, siis toome allpool asünkroonmootori töörežiimi iseloomustavate suuruste määramise käigu lihtsustatud ringdiagrammi järgi (joon. 27-5).



Joon. 27-5. Võimsuste määramine ringdiagrammist

Primaarvõimsus P_1. Asünkroonmootori primaarvõimsus

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1,$$

kus U_1 ja I_1 on faasis olevad suurused. Seega püsiva primaarpinge ($U_1 = \text{const}$) puhul on võimsus P_1 võrdeline staatori voolu aktiivkomponendiga, s. o. $P_1 \equiv I_1 \cos\varphi_1$. Kui ringdiagrammi joonestamiseks valitud voolu mastaap on m_i amprit pikkusühiku (näiteks sentimeetri) kohta (A/cm), siis võimsuse mastaap

$$m_p = m_1 U_1 m_i \text{ W/cm}.$$

Seega primaarvõimsuse P_1 väärtus mingi voolu I_1 puhul on ringdiagrammil võrdeline sirglõiguga DK_1, mis saadakse läbi vooluvektori I_1 otsa sirgjoonele OK_1 püstitatud ristlõiguna, s. o.

$$P_1 = m_p \cdot DK_1. \qquad (27\text{-}6)$$

Sirgjoont OK_1 nimetatakse primaarvõimsuse jooneks ja tähistatakse lühidalt $P_1 = 0$, kuna sellel joonel on primaarvõimsus võrdne nulliga.

Elektromagnetiline võimsus P_{em} **ja elektromagnetiline moment** M. Elektromagnetilise võimsuse määramiseks ringdiagrammist

(joon. 27-5) lähtume tema avaldisest (25-25), mis Γ-kujulise aseskeemi korral on järgmine:

$$P_{em} = m_1 I_2'' \frac{r_2'}{s}. \qquad (27\text{-}7)$$

Valemist (27-7) on näha, et P_{em} on võrdne nulliga tühijooksul ($s = 0$), kuna siis $I_2'' = 0$ ning libistusel $s = \infty$, kuna siis $\frac{r_2'}{s} = 0$. Seega elektromagnetilise võimsuse jooneks, millel tema väärtused on võrdsed nulliga ($P_{em} = 0$), on punkte O' ja G ühendav sirgjoon.

Lõik G_1D on võimsuse mastaabis võrdne elektromagnetilise võimsusega, s. t.

$$P_{em} = m_p \cdot G_1D. \qquad (27\text{-}8)$$

Elektromagnetilise võimsuse järgi määratakse elektromagnetiline pöördemoment masina võllil

$$M = P_{em}/\Omega_1,$$

kus

$$\Omega_1 = 2\pi n_1$$

on pöördvälja mehaaniline nurkkiirus. Seega

$$M = \frac{m_p}{2\pi n_1} G_1D = m_M \cdot G_1D, \qquad (27\text{-}9)$$

kus

$$m_M = \frac{m_p}{2\pi n_1}$$

on momentide mastaap.

Maksimaalse pöördemomendi M_{max} väärtuse saame ringdiagrammi (joon. 27-5) järgi, kui tõmbame ringi keskpunktis C sirglõigule $O'G$ ristjoone ja viimase lõikepunktist ringdiagrammiga D_1 paralleeljoone D_1H_1 lõigule DG_1. Lõik D_1H_1 annab võimsuse mastaabis $P_{em_{max}}$ väärtuse ja momendi mastaabis maksimaalse (vääratus-)momendi M_{max} väärtuse, s. o.

$$M_{max} = m_M \cdot D_1H_1. \qquad (27\text{-}10)$$

Suhe M_{max}/M_n määrab mootori ülekoormatavuse ning on normeeritud kehtivate standarditega, olenevalt mootorite pöörlemiskiirusest. Üldiselt on alati

$$\frac{M_{max}}{M_n} \geqslant 1{,}7.$$

Mehaaniline võimsus P_m. Mehaanilise võimsuse avaldise (25-24) võime Γ-kujulise aseskeemi jaoks ümber kirjutada järgmiselt:

$$P_m = m_1 I_2''^2 r_2' \frac{1-s}{s}. \qquad (27\text{-}11)$$

Mehaaniline võimsus on võrdne nulliga tühijooksul ($s = 0$), mil $I_2'' = 0$ ning lühisel ($s = 1$), sest siis $r_2' \frac{1-s}{s} = 0$. Seega mehaanilise võimsuse joon ($P_m = 0$) on punkte O' ja E ühendav sirgjoon. Lõik E_1D kujutab võimsuse mastaabis mehaanilist võimsust

$$P_m = m_p \cdot E_1D. \qquad (27\text{-}12)$$

Sekundaarvõimsus P_2. Nagu selgus asünkroonmasina energiadiagrammi uurimisel (p. 25-6), on asünkroonmootori võllilt saadav kasulik võimsus P_2 (25-23) väiksem mehaanilisest võimsusest P_m mehaaniliste kadude võimsuse p_m ja lisakao võimsuse p_l võrra. Ringdiagrammi koostamisel kaovõimsusi p_m ja p_l arvesse ei võeta, sest need kaod on võimsuse P_m komponendid. Seepärast pole ringdiagrammist võimalik leida ka sekundaarvõimsuse P_2 väärtust. Mehaaniliste kadude võimsust p_m võime ringdiagrammis teatava ligikaudsusega arvestada, kui kanname punktist O' ülespoole võimsuse mastaabis (joon. 27-5) lõigu $O'O'' = p_m/m_p$. Seega punkt O'' vastab tegeliku asünkroonmasina tühijooksule. Mehaaniliste kadude suurus p_m sõltub masina pöörlemiskiirusest n. Ligikaudu võib arvestada $p_m \equiv n^{1,5}$. Seega p_m omab maksimaalset väärtust masina tühijooksul ja muutub nulliks seisva masina korral (s. t. lühisel). Kui jätame tähele panemata lisakao p_l väärtuse, siis on sekundaarvõimsuse jooneks punkte O'' ja E ühendav sirglõik.

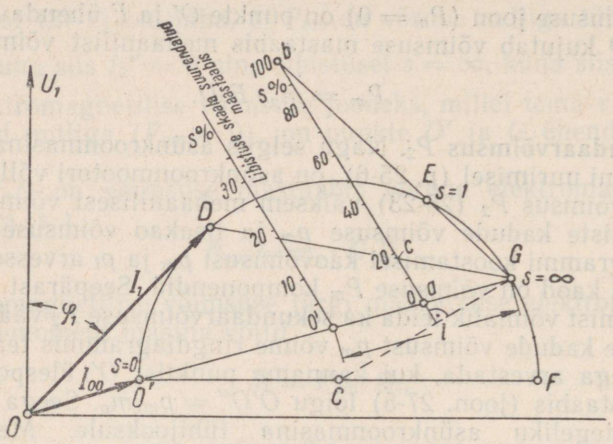
Nagu eespool selgus (p. 25-6), võivad lisakaod p_l omada küllaltki suurt väärtust, mistõttu täpsematel arvutustel tuleb seda sekundaarvõimsuse P_2 määramisel arvestada. Nagu näitab teoreetiline lisakadude analüüs, on nad võrdelised sekundaarvoolu ruuduga $I_2'^2$ ning sõltuvad masina pöörlemiskiirusest astmes $n^{1,5}$. Seepärast pole p_l väärtusi võimalik kujutada lihtsalt ringdiagrammis. Sekundaarvõimsuse P_2 täpsem väärtus leitakse seega vajaduse korral pärast mehaaniliste kadude p_m ja lisakao p_l määramist ning mehaanilistest kadudest lahutamist valemi (25-23) põhjal.

Libistus s. Valemi (25-39) järgi võib ringdiagrammi (joon. 27-5) põhjal libistuse määrata suhtena

$$s = \frac{E_1G_1}{DG_1}, \qquad (27\text{-}13)$$

mis annab siiski ebatäpseid tulemusi. Seepärast on parem libistus s määrata ringdiagrammi abil graafiliselt, nagu see on toodud joonisel 27-6. Selleks ühendame ringi keskpunkti C punktiga G ja risti sirgega CG joonestame libistuse skaala $s\%$. Lõikepunktis a on libistuse skaala nullpunkt $s = 0$. Libistuse skaala ja läbi punktide G ja E joonestatud sirge lõikepunktis b on libistus $s = 100\%$. Punktide a ja b vahemaa jagame võrdseteks osadeks, nagu on

näidatud joonisel 27-6. Skaala paremaks jaotamiseks valime lõigu ab pikkuseks täisarv sentimeetrit (näit. $ab = 10$ cm, siis 1 cm = $= 10\%\ s$). Antud voolule I_1 vastavast punktist joonestatud sirge DG lõikepunkt c libistuse skaalaga annabki otsitava libistuse suuruse.



Joon. 27-6. Libistuse skaala määramine

Väikeste libistuste täpsemaks määramiseks võime libistuse mastaapi vabalt valitud vahekorras suurendada, nihutades teda paralleelselt sirgega ab vasakule mingile kaugusele l punktist G, mõõdetud mööda sirget $O'G$ (vt. joon. 27-6).

Kasutegur η. Kasuteguri η graafilised määramisviisid annavad ebatäpseid tulemusi, mistõttu võib η määrata teatava ligikaudsusega suhtena (joon. 27-5):

$$\eta = \frac{DE_1}{DK_1}. \qquad (27\text{-}14)$$

Kuna ka niisugune kasuteguri määramisviis annab ebatäpseid tulemusi, siis tavaliselt määratakse η üksikute kaovõimsuste väärtuste arvutusliku (või katselise) määramise teel seose (25-26) järgi.

27-3. ASÜNKROONMOOTORI RINGDIAGRAMMI KOOSTAMINE KATSEANDMETE PÕHJAL

Sageli tekib vajadus määrata asünkroonmootori põhiandmed M_n, $k_m = M_{max}/M_n$, cos φ ja s katselisel teel. Seejuures suure võimsusega mootorite korral, mida pole võimalik katsetada otseselt, kasutatakse kaudsete katsetuste, s. o. tühijooksu- ja lühisekatse

andmeid. Allpool on toodud normaalse ehitusega lühisrootoriga asünkroonmootori ringdiagrammi koostamise käik kehtivate riiklike normide ГОСТ 7217-58 järgi.

Normaalse ehitusega lühisrootoriga asünkroonmootoriks loeme seejuures masinat, mis omab lihtsat ühevardalist lühismähist rootoris ja mille puhul masina parameetrid (x_1, x_2', x_m, r_1, r_2', r_m) ei sõltu koormusest.

Lühisrootoriga asünkroonmootori ringdiagrammi ehitamiseks on vaja järgmisi andmeid.

1. Tühijooksu faasivool I_0 nimipingel $U = U_n$ ja nimisagedusel $f = f_n$.

2. Tühijooksu kaovõimsuse ja mehaaniliste kadude võimsuse vahe $P_0 - p_m$.

3. Lühise faasivool I_k nimipingel, mis saadakse ümberarvutuse teel valemist

$$I_k = I_{kn} \frac{U_n}{U_k}, \tag{27-15}$$

kus I_{kn} — lühise faasivool pingel U_k.

4. Lühise kaovõimsus P_k nimipingel ja nimisagedusel, mis saadakse ümberarvutuse teel valemist

$$P_k = P_{kn} \left(\frac{I_k}{I_{kn}} \right)^2, \tag{27-16}$$

kus P_{kn} — lühise kaovõimsus voolul I_{kn}.

5. Staatori ühe faasi takistus r_1 nimi-töötemperatuuril ГОСТ 183-55 järgi

$$r_1 = r_{10} \frac{235 + \tau}{235 + \tau_0}, \tag{27-17}$$

kus r_{10} — mähise oomiline takistus temperatuuril τ_0,

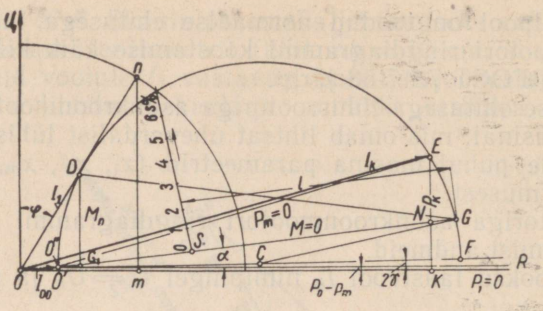
τ — mähise töötemperatuur ГОСТ 183-55 järgi (tavaliselt 75°).

Nende andmete põhjal toimub ГОСТ 7217-58 järgi ringdiagrammi koostamine järgmiselt.

Valime voolu mastaabi $m_i \left(\frac{\text{A}}{\text{cm}} \right)$, mille järgi saame võimsuse mastaabi kohta avaldise

$$m_p = \frac{m_1 U_1 m_i}{1000} \quad \frac{\text{kW}}{\text{cm}}. \tag{27-18}$$

Joonestame koordinaatteljestiku, kus ordinaattelje sihis kujutame vektori U_1. Abstsisstelg kujutab siin primaarvõimsuse joont $P_1 = 0$. Leiame selles koordinaatteljestikus ideaalse tühijooksu punkti O' tühijooksuvoolu I_0 ja kaovõimsuste $P_0 - p_m$ järgi (joon.



Joon. 27-7. Asünkroonmootori ringdiagrammi ehitamine katseandmete põhjal

27-7). Punktist O' joonestame abstsissteljega paralleelse sirge $O'R$.

Punktist O' joonestame sirge $O'F$, mis moodustab sirgega $O'R$ nurga $2\gamma_1$, mille leiame seosest

$$\sin 2\gamma_1 = \frac{2I_0 r_1}{U_1}. \qquad (27\text{-}19)$$

Nüüd leiame lühise punkti E lühise voolu I_k (27-15) ja lühise kaovõimsuse P_k (27-16) (lõik EK) järgi.

Läbi punktide O' ja E joonestame ringjoone, mille keskpunkt O_k asub sirgel $O'F$. Ringi keskpunkti leidmiseks jagame sirglõigu $O'E$ pooleks ja joonestame leitud poolituspunktist ristsirge kuni lõikumiseni sirgega $O'F$.

Elektromagnetilise momendi joone $M = 0$ leiame, kui joonestame sirgega $O'F$ nurga α moodustava sirge $O'G$. Nurga α leiame seosest

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D_a r_1}{U_1}, \qquad (27\text{-}20)$$

kus D_a — ringdiagrammi läbimõõt (lõik $O'F$) amprites.

Ühendades punktid $O'E$ sirgega, saame mehaanilise võimsuse joone $P_m = 0$.

Reaalse tühijooksu punkti O'' saamiseks kanname alates punktist O' ülespoole võimsuse mastaabis sirglõigu $O'O'' = p_m/m_p$.

Punktist O raadiusega 100 mm joonestame ringi kaare $\cos\varphi$ määramiseks.

Libistuse skaala ehitamiseks toimime järgmiselt:

1) punktist E joonestame ristsirge EK abstsissteljega ja leiame sirgete EK ja $O'G$ lõikepunkti N;

2) ühendame sirgega punktid C ja G;

3) punktist G kanname mööda sirglõiku $O'G$ lõigu pikkusega $l = GS$, kusjuures

$$l = \frac{EN}{O'N} \cdot 100 \text{ cm}; \qquad (27\text{-}21)$$

4) punktist S joonestame risti sirglõiguga CG libistuse skaala;

5) alates punktist S kanname libistuse skaalale jaotused libistuse määramiseks, mastaabis $1\%\ s = 1$ cm.

Nimiväärtuste leidmine ringdiagrammist toimub nimimomendi M_n alusel, mille arvutame seosest

$$M_n = (P_2 + p_m + p_l)\,\frac{n_1}{n} \text{ kW}, \qquad (27\text{-}22)$$

kus P_2 — kasulik võimsus võllil, mis on antud masina nimiandmete sildil; õieti on valemi (27-22) järgi määratav suurus M_n mitte moment, vaid elektromagnetiline võimsus nimitöörežiimil; kuna need suurused on võrdelised, siis praktikas nimetatakse suurust M_n sageli momendiks võimsuse mastaabis;

p_m — hõõrdekadu (leiame tühijooksukatse järgi);

$p_l = 0{,}005P_1$ — lisakadu nimikoormusel, kusjuures $P_1 = m_1U_1I_1\cos\varphi_1$ on primaarvõimsus masina sildiandmete järgi;

n_1, n — vastavalt sünkroon- ja nimipöörlemiskiirus.

Kanname nüüd ringdiagrammile saadud nimimomendi M_n väärtuse (võimsuse mastaabis). Selleks joonestame sirglõigule $O'F$ ristsirge DG_1, nii et $DG_1 \equiv M_n$ (võimsuse mastaabis).

Sirglõik OD annab meile primaarvoolu väärtuse; tema pikendus kuni lõikumiseni kaarega punktis n annab võimsusteguri väärtuse asünkroonmootori nimivõimsusel, s. t.

$$\cos\varphi_1 = \frac{nm}{100},$$

kus nm on mõõdetud mm-tes.

Sirglõigu DG lõikepunkt libistuse skaalaga annab libistuse väärtuse $s\%$ nimivõimsusel.

Kasuteguri η väärtus määratakse ГОСТ 7217-58 kohaselt üksikute kaovõimsuste määramise teel:

1) mehaanilised kaod p_m ja rauaskao p_{r1} määrame tühijooksukatse järgi (vt. p. 25-7);

2) staatori vaseskao määrame seosest

$$p_{v1} = 3I_1^2r_1;$$

3) rootori vaseskao määrame seosest

$$p_{v2} = \frac{P_{em}}{100}\,s,$$

kus s ja P_{em} on määratud ringdiagrammi abil nimipöördemomendi M_n väärtuse järgi ($P_{em} \equiv DG_1$):

4) lisakadu $p_l = 0{,}005P_1$.

Seega on kasulik võimsus võllil

$$P_{em} = P_1 - p_{v1} - p_{r1};$$

$$P_2 = P_1 - p_{\ddot{u}} = P_1 - (p_{v1} + p_{v2} + p_{r1} + p_m + p_l)$$

ja kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \left(1 - \frac{p_{\ddot{u}}}{P_1}\right) 100\%.$$

Analoogiliselt toimub ringdiagrammi koostamine ka faasirootoriga asünkroonmootori puhul.

XXVIII PEATÜKK

ASÜNKROONMOOTORI KÄIVITAMINE. SÜGAV- JA KAKSIKUURETEGA MOOTORID

28-1. ASÜNKROONMOOTORI KÄIVITAMISE ÜLDISI KÜSIMUSI

Asünkroonmootori käivitamiseks nimetatakse tööolukorda pärast mootori ühendamist võrguga kuni nimikiiruse saavutamiseni. Käivitamise kulg sõltub elektrimootori, -võrgu ja -ajami, samuti ka käivitatava töömasina omadustest. Elektriajami all mõistetakse seadet, mis koosneb elektrimootorist ning selle juurde kuuluvast aparatuurist ja mis on määratud mingi töömehhanismi (näit. metallitreipingi, pumba, ventilaatori, konveieri jne.) käitamiseks. Kuna asünkroonmootoreid (peamiselt lühisrootoriga mootoreid) kasutatakse laialdaselt raskete käivitustingimustega ajamites, siis on nende mootorite tööomaduste tundmine käivitamisel väga tähtis.

Nagu nähtub asünkroonmasina aseskeemi (joon. 26-2, *b*) töövooluharu takistuse avaldisest $Z_t = (r_1 + r_2'/s) + j(x_1 + x_2')$, on see takistus suurtel libistustel $s \approx 1$ tublisti väiksem kui normaalkoormusel. Seetõttu kaasuvad käivitamisega suured voolutõuked $I_k = (5 \ldots 7)I_n$, mis kutsuvad esile võrgupinge kõikumisi ja teatud tingimustel mootori mähiste ülekuumenemist.

Teiselt poolt on vajalik, et mootor arendaks käivitamisel küllalt suurt momenti, millega oleks tagatud seadme normaalne kiirendamine.

Asünkroonmootori käivitusprotsessi hindamisel huvitavad meid peamiselt järgmised näitajad:

1) käivitusvoolu kordsus $k_i = I_k : I_n$;

2) käivitusmomendi kordsus $k_m = M_k : M_n$.

Vastavalt riiklikele normidele ГОСТ 186-52 ei või algkäivitusmomendi ja nimipöördemomendi suhe $k_m = \frac{M_k}{M_n}$ kaitstud ja kinnist

tüüpi lühisrootoriga asünkroonmootoritel võimsusega 0,6 kuni 100 kW olla väiksem tabelis 28-1 toodud väärtustest; käivitusvoolu ja nimivoolu suhe $k_i = \frac{I_k}{I_n}$ ei tohi samadel asünkroonmasinatel olla suurem tabelis 28-2 toodud väärtustest. Seejuures toodud k_i väärtused vastavad käivitusele nimipinge juures.

Tabel 28-1

Käivitusmomendi kordsus

Võimsus kW	Kaitstud tüüpi masinad				Kinnist tüüpi masinad			
	Sünkroonpöörlemiskiirus n_1 p/min							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	Käivitusmomendi ja nimimomendi suhe							
0,6	—	1,7	—	—	2,0	1,7	—	—
1,0	1,8	1,8	1,3	—	2,0	1,8	1,3	—
1,7	1,8	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
2,8	1,6	1,8	1,3	—	1,8	1,8	1,3	—
4,5	1,6	1,4	1,3	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
7	1,5	1,4	1,1	1,0	1,6	1,4	1,4	1,5
10	1,5	1,2	1,1	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
14	1,2	1,2	1,2	1,1	1,3	1,3	1,4	1,3
20	1,2	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
28	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
40	1,1	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,4	1,3
55	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3
75	1,0	1,0	1,0	—	1,1	1,1	1,2	—
100	1,0	1,0	—	—	1,1	1,1	—	—

Tabel 28-2

Käivitusvoolu kordsus

Võimsus kW	Sünkroonpöörlemiskiirus p/min			
	3000	1500	1000	750
	Käivitusvoolu ja nimivoolu suhe			
0,6 kuni 28	7	7	6,5	5,5
40 kuni 100	6,5	6,5	6,5	6,5

Käivitusvoolu kordsuse avaldisest

$$k_i = \frac{I_k}{I_n} = \frac{U_1}{I_n z_k}$$

nähtub, et käivitusvoolu kordsust on võimalik vähendada primaarpinge U_1 alandamine või asünkroonmasina käivitustakistuse z_k suurendamise teel. Primaarpinge alandamine kutsub esile käivitusmomendi vähenemise võrdeliselt pinge ruuduga (vt. valem 26-6) ja käivitusaja pikenemise. Seetõttu püütakse võimalikult vältida neid käivitamismooduseid, mis tingivad primaarpinge alanemist masina klemmidel. Käivitustakistuse suurendamine lisatakistuste näol staatori ahelas on ekvivalentne primaarpinge alandamisega. Käivitustakistuse suurendamine rootori ahela lisatakistuse sisseviimise teel on otseselt võimalik ainult faasirootoriga asünkroonmootori korral. Nagu selgus eespool (p. 26-2) võimaldab rootori ahela aktiivtakistuse suurendamine suurendada ka käivitusmomenti.

Asünkroonmootorit on võimalik käivitada:

1) käivitusreostaadi abil, mis on lülitatud rootori vooluahelasse,

2) mootori otsese lülitamisega elektrivõrku,

3) primaarpinge madaldamisega mootori klemmidel.

Neist käivitusviisidest on esimene kasutatav vaid faasirootoriga asünkroonmootori korral, kus aktiivtakistuse viimisega rootori vooluahelasse väheneb käivitusvool ja suureneb käivitusmoment.

Teist käivitusviisi kasutatakse laialdaselt nii normaalse kui ka spetsiaalse konstruktsiooniga lühisrootoritega asünkroonmootorite käivitamisel.

Kolmandat käivitusviisi kasutatakse sageli lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitamisel, kui võrgu töö seisukohalt on oluline voolutõugete vähendamine. Nagu eespool oli öeldud, toob primaarpinge madaldamine endaga kaasa ajami käivitusmomendi vähenemise, mida tuleb arvestada.

Ekspluatatsiooni seisukohalt on väga oluline, et käivitus oleks võimalikult lihtne ega nõuaks keerulisi lisaaparaate, mis teeb seadme kalliks, raskendab teenindamist ning võib olla lisarikete allikaks. Seepärast tuleb alati püüda kasutada kõige lihtsama ja kindlama ehitusviisiga mootoreid, nimelt lühisrootoriga mootoreid, ning lülitada need otseselt võrku. Kaasaegsed elektrivõrgud on võimsad ja võimaldavad voolutõuke ja võrgupinge langu seisukohalt lülitada otseselt võrku mootoreid võimsusega kuni mitusada kilovatti. Ainult siis, kui otsene sisselülitamine võrgu seisukohalt pole lubatav või tekivad erilised nõuded käivitusmomendi suhtes, tuleb kasutada teisi käivitusviise.

Allpool vaatleme lähemalt käivitusprotsessi iseloomustavaid näitajaid ning üksikuid käivitamisviise.

Kui asünkroonmootor töötab mingil kindlal koormusel ühtlase kiirusega (statsionaarne režiim), siis ta peab ületama koormusmomendi M_t, mis koosneb mehaaniliste ja lisakadude poolt tekitatud takistusmomendist $M_{1m} = P_{1m}/\Omega_2$ ja kasulikust takistusmomendist $M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2}$, mis on tekitatud töömehhanismi poolt ($\Omega_2 = 2\pi n_2$ — mehaaniline nurkkiirus), s. o.

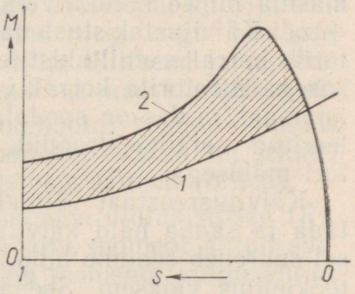
$$M = M_{1m} + M_2 = M_t. \tag{28-1}$$

Kui mingi välise põhjuse mõjul rikutakse seda momentide (28-1) tasakaalu, siis muutub ka agregaadi (mootori) pöörlemiskiirus. See pöörlemiskiiruse muutumine toimub nn. dünaamilise momendi M_J mõjul, mis on mootori poolt arendatava momendi ja staatilise koormusmomendi M_t vahe:

$$M_J = M - M_t. \tag{28-2}$$

See momentide vahe (28-2) võib olla kas positiivne või negatiivne suurus, olenevalt sellest, kumb momentidest (M või M_t) on suurem. Kui mootori moment M on suurem takistusmomendist M_t, siis dünaamiline moment M_J on positiivne ning agregaadi (ajami) kiirus suureneb. Juhul kui takistusmoment M_t on suurem mootori poolt tekitatud momendist M, siis tekkiv dünaamiline moment M_J on negatiivne ja ajami kiirus väheneb. Mida suurem on oma absoluutväärtuse poolest M_J, seda rutemini toimub kiiruse muutumine. Nähtust, mis toimub püsiva (statsionaarse) töörežiimi rikkumise momendist kuni uue stabiilse olukorra saavutamiseni, nimetatakse siirdeprotsessiks.

Selleks et asünkroonmootor võiks käivitamisel ajami kiiruse viia nullist kuni nimikiiruseni, on vaja, et asünkroonmootori moment M kogu kiiruse muutumise vahemikus oleks suurem takistusmomendist M_t. Sel korral on dünaamiline moment kogu aeg positiivne ning mootor võib ajamit kiirendada. Selline olukord on näidatud joonisel 28-1. Juhul kui asünkroonmootori moment muutub alates mingist kiirusest väiksemaks takistusmomendist, võib ajam jääda püsivalt töötama antud kiirusel ja ei saavuta nimikiirust. Niisugune nähtus võib esineda mootori korral, milles asünkroonsed lisamomendid on suhteliselt suured (vt. p. 26-4).



Joon. 28-1. Momentide tasakaalu graafiline kujutis ajami käivitamisel:

1 — takistusmoment, *2* — asünkroonmootori moment; viirutusega on kujutatud dünaamiline moment

Kui faasirootoriga asünkroonmootori käivitada lühistatud rootorimähisega, siis arendab ta väikest käivitusmomenti $M_k = (0{,}4 \ldots 0{,}8) M_n$ suhteliselt tugeva käivitusvoolu juures $I_k = (5 \ldots 7) I_n$.

Kui on vaja ainult vähendada käivitusvoolu, siis, nagu see nähtub avaldisest (25-8), on seda kõige parem teha induktiivtakistuse lülitamisega rootoriahelasse, sest sel korral on kaod käivitusreostaadis minimaalsed. Kuid induktiivtakistuse lülitamisel rootoriahelasse ei vähene üksnes rootori vool I_2, vaid ka rootori võimsustegur

$$\cos \psi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 + x_l)^2}},$$

kus x_l — induktiiv-käivitustakistus.

Käivitusvoolu ja $\cos \psi_2$ vähenemise tõttu aga väheneb ka käivitusmoment ning võib osutuda liiga väikeseks. Seadmeis, kus käivitusmomendi suurus ei ole olulise tähtsusega, on otstarbekam kasutada normaalseid lühisrootoriga asünkroonmootoreid, millede $M_k \approx 1{,}2 M_n$. Seepärast kasutatakse kirjeldatud käivitusviisi väga harva.

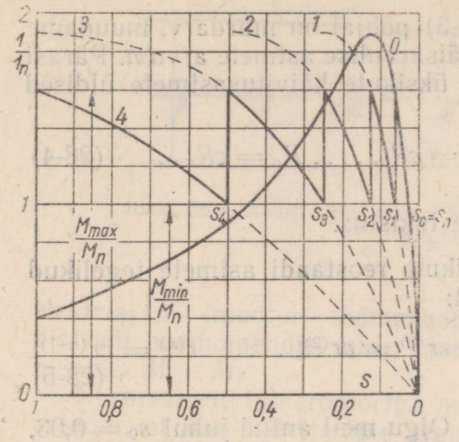
Hoopis paremaid tulemusi annab käivitamise perioodiks aktiivtakistuse lülitamine rootoriahelasse. Sel puhul on üheaegselt käivitusvoolu vähendamisega võimalik suurendada käivitusmomenti. See näiline vastuolu on seletatav rootori voolu aktiivkomponendi $I_2 \cos \psi_2$ suurenemisega, mistõttu suureneb ka moment $M = \Phi I_2 \cos \psi_2$. Sobiva aktiivtakistuse valimisega on võimalik faasirootoriga asünkroonmootorit käivitada isegi vääratusmomendiga. Nagu nägime eespool (p. 26-2), peab sel puhul rootoriahela aktiivtakistus $r_2' + r_l'$ (kus r_l' käivitustakistus) võrduma masina lühise induktiivtakistusega $x_1 + x_2'$, s. o. $r_2' + r_l = x_1 + x_2'$. Käivitustakistustena kasutatakse väikese võimsusega mootorite korral metalltakistitega õli-käivitusreostaate ja suure võimsusega mootorite korral vesireostaate. Vesireostaadid koosnevad anumast, milles on soodalahus ja kuhu asetatakse üksteisest isoleeritud metallelektroodid, mis on ühendatud harjade kaudu rootori mähisega.

Käivitusreostaat võimaldab asünkroonmootorit sujuvalt käivitada ja saada häid käivituskarakteristikuid. Ent tema kasutamisel suureneb seadme hind, tema teenindamine on keerulisem ning töökindlus väiksem. Seepärast on faasirootoriga asünkroonmootori kasutamine õigustatud ainult juhul, kui on vaja saavutada suurt käivitusmomenti nõrga käivitusvoolu juures või teostada kiiruse reguleerimist.

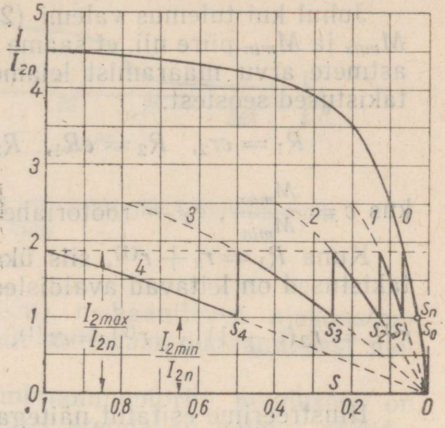
Faasirootoriga asünkroonmootorite käivitusmoment võib olla

arvutatud nii, et see ei lange alla teatud piiri kogu käivituse jooksul, võib nii, et käivitusvool ei ületa etteantud väärtust.

Vaatleme juhtu, kui on etteantud maksimaalse ja minimaalse momendi väärtused M_{max} ja M_{min}, mille piirides võib pöördemoment käivitamisel kõikuda. Kui käivitamine toimub etteantud maksimaalse momendiga, siis käivitamise algul töötab mootor momendi karakteristikul *4* (joon. 28-2). Teatava aja möödumisel,



Joon. 28-2. Faasirootoriga asünkroonmootori pöördemomendi karakteristikud käivitamisel lisatakistustega rootoriahelas



Joon. 28-3. Sekundaarvoolu kulg faasirootoriga asünkroonmootori käivitamisel

kui libistus väheneb oma väärtuselt käivitamisel $s_m = 1$ kuni väärtuseni s_4, saavutab moment etteantud minimaalse väärtuse M_{min}. Selle rootori kiiruse juures tuleb käivitusreostaat ümber lülitada käivitustakistusele *3*, kusjuures $R_3 < R_4$. Mootor hakkab töötama nüüd karakteristikul *3* ja töötab sellel kuni libistuseni s_3. Siin toimub jälle käivitustakistuse ümberlülitamine ning kogu protsess kordub, kuni kõik käivitustakistused on välja lülitatud ja mootor hakkab töötama asünkroonmootori loomulikul karakteristikul *0*.

Joonisel 28-3 on toodud sama asünkroonmootori sekundaarvoolu kõikumised käivitamise jooksul. Nagu jooniselt nähtub, on sekundaarvoolu muutused kõikidel käivitustakistuste astmeil võrdsed.

Juhul kui käivitusreostaadi üksikute astmete üldtakistused (R_1, R_2, R_3, ... R_n) on valitud nii, et maksimaalne moment antud astmel ei ületa 85% vääratusmomendist, võib momendi kulgu antud piirides (M_{max} ja M_{min}) lugeda sirgjooneliseks (vt. joon. 28-2). Niisugusel korral toimub käivitusreostaadi astmete ja takistuste arvutamise käik järgmiselt.

Asünkroonmootori pöördemomendi põhikarakteristiku *0* põhjal

leiame etteantud väärtuste M_{max} ja M_{min} järgi libistuste s_0 ja s_1 väärtused. Andes ette viimase astme libistuse väärtuse $s_m = 1$, leiame vajaliku käivitusastmete arvu valemiga

$$n = \frac{\lg \frac{s_m}{s_1}}{\lg \frac{s_1}{s_0}}. \qquad (28\text{-}3)$$

Juhul kui tulemus valemi (28-3) põhjal on murdarv, muudame M_{max} ja M_{min} piire nii, et saame täisarvulise astmete arvu n. Pärast astmete arvu määramist leiame üksikute käivitusastmete üldised takistused seostest:

$$R_1 = cr_2, \quad R_2 = cR_1, \quad R_3 = cR_2, \ldots, R_n = cR_{n-1}, \qquad (28\text{-}4)$$

kus $c = \frac{M_{max}}{M_{min}}$, r_2 — rootoriahela takistus.

Kuna $R_1 = r_2 + r^{(1)}$, siis üksikute reostaadi astmete tegelikud takistused on leitavad avaldistest:

$$r^{(1)} = r_2(c-1), \quad r^{(2)} = cr^{(1)}, \quad r^{(3)} = cr^{(2)}, \ldots, \quad r^{(n)} = cr^{(n-1)}. \qquad (28\text{-}5)$$

Illustreerime esitatut näitega. Olgu meil antud juhul $s_0 = 0{,}03$, $s_1 = 0{,}06$.

Seega suhe $c = \frac{M_{max}}{M_{min}} = \frac{s_1}{s_0} = \frac{0{,}06}{0{,}03} = 2$,

käivitusastmete arv valemi (28-3) järgi:

$$n = \frac{\lg \frac{1}{0{,}06}}{\lg \frac{0{,}06}{0{,}03}} = \frac{1{,}220}{0{,}301} \approx 4.$$

Rootori mähise takistuse r_2 korral on üksikute astmete takistused

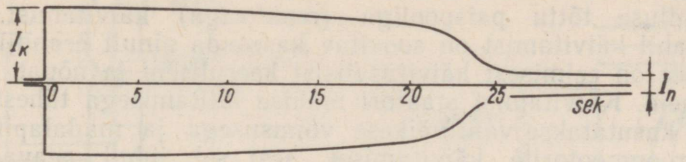
$$R_1 = 2r_2; \quad R_2 = 2^2 r_2 = 4r_2; \quad R_3 = 2^3 r_2 = 8r_2; \quad R_4 = 2^4 r_2 = 16r_2.$$

Seega peab kogu käivitusreostaadi ühe faasi takistus olema antud juhul 15 korda suurem rootori ühe faasi takistusest.

28-4. LÜHISROOTORIGA ASÜNKROONMOOTORI KÄIVITAMINE OTSESE VÕRKU LÜLITAMISEGA

Lühisrootoriga asünkroonmootori otsesel võrku lülitamisel tekivad voolutõuked, mille suurus normaalse ehitusviisiga asünkroonmootoritel $I_k = (5 \ldots 7) I_n$ (vt. tabel 28-2). Käivitusvoolu muutu-

mist sõltuvalt ajast kujutab joonisel 28-4 toodud kõver. Sellelt selgub, et käivitamise algul võrdub vool lühisvooluga nimipingel; käivitusprotsessi vältel vool nõrgeneb algul aeglaselt ning käivitusprotsessi lõpul järsult, saavutades lõpliku väärtuse, mis vastab koormusele. Üldiselt võib käivitusvoolu keskväärtuseks võtta voolu 0,93 I_k. Asünkroonmootorite käivitumine võib kesta mõnest sekundist kuni mõnekümne sekundini (joon. 28-4), olenedes peamiselt



Joon. 28-4. Asünkroonmootori 500 kW, 6 kV, 59 A käivitusvoolu ajaline kulg

elektriajami (mootor—töömehhanism) mehaanilisest ajakonstandist või hoomomendist ning ajamile mõjuvast dünaamilisest momendist $M - M_t$.

Normaalsete lühisrootoriga asünkroonmootorite puuduseks on asjaolu, et nad käivitamise alghetkel arendavad väikest pöördemomenti $M_k = (1{,}1 \ldots 1{,}4) M_n$.

Elektrivõrgu töö seisukohalt on asünkroonmootori otsene võrku lülitamine lubatav, kui

$$\frac{I_k}{I_n} \leqslant \frac{3}{4} + \frac{P_i}{4P_m}, \qquad (28\text{-}6)$$

kus P_i — alajaama installeeritud võimsus,
P_m — mootori võimsus.

Näiteks kui üldine installeeritud võimsus on 100 kVA ja mootori võimsus 5 kW, siis $\frac{I_k}{I_n} = 5 < \frac{3}{4} + \frac{100}{4 \cdot 5} = 5{,}75$, s. t. antud korral on võimalik mootorit otse võrku lülitada. Kui aga mootori võimsus oleks 20 kW, siis $\frac{3}{4} + \frac{100}{4 \cdot 20} = 2$ ja järelikult võrgu töö seisukohalt tuleb piirata käivitusvoolu.

28-5. LÜHISROOTORIGA ASÜNKROONMOOTORITE KÄIVITAMINE KLEMMIPINGE ALANDAMISEGA

Juhul kui võrgu töö seisukohalt pole lubatav lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitamine otsese lülitamise teel võrku, käivitatakse mootor

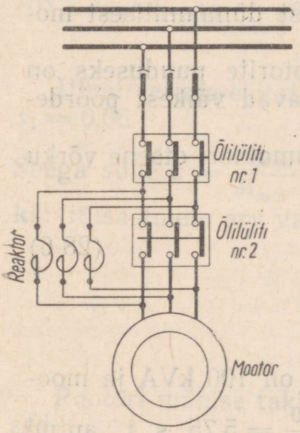
1) paispooli (reaktori) lülitamisega järjestikku staatori mähisega,

2) autotrafo abil,

3) staatori mähise lülitamisega tähest kolmnurka.

Kõik need käivitusviisid tingivad pinge madaldamist mootori klemmidel, mistõttu väheneb käivitusvool, kuid väheneb ka käivitusmoment ja suureneb käivituse kestus.

Nimetatud käivitusviisidest tuleb eelistada oma lihtsuse ja töökindluse tõttu paispooliga (reaktoriga) käivitamist. Autotrafo abil käivitamist on soovitav kasutada ainult erandjuhtudel, sest see on eelmisest käivitusviisist keerulisem ja nõuab rohkem seadmeid. Käivitamist staatori mähise lülitamisega tähest kolmnurka kasutatakse vaid väikese võimsusega ja madalapingeliste asünkroonmootorite käivitamisel, sest sel juhul peavad kõigi mähiste algused ja lõpud olema välja toodud klemmplaadile. Kuid seoses toitevõrgu võimsuse suurenemisega pole väikese võimsusega mootorite korral selle käivitamisviisi kasutamise järele eriti suurt vajadust.



Joon. 28-5. Asünkroonmootori käivitamise põhimõtteskeem reaktori abil

Käivitamine reaktori abil (joon. 28-5). Reaktorid lülitatakse järjestikku staatori mähisega, mis võimaldavad madaldada pinget käivitamisel tavaliselt kuni $(0{,}45 \ldots 0{,}65)\,U_n$. Kõrgepingelise mootori käivitamisel lülitatakse algul sisse õlilüliti *1* ja alles pärast õlilüliti *2*. Seega reaktor lühistatakse õlilüliti *2* abil ning mootor saab toite otse võrgust.

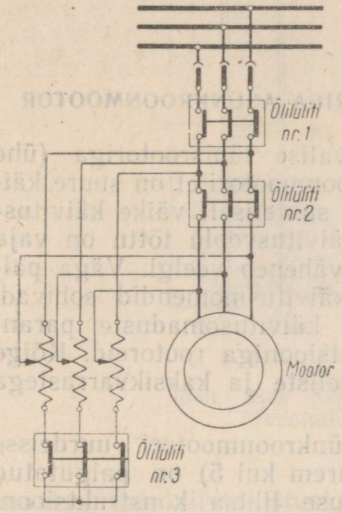
Kui käivitamisel madaldatakse pinget k korda, siis ka käivitusvool väheneb k korda, käivitusmoment aga väheneb k^2 korda.

Lüliti *1* peab olema suuteline lahutama mootorit võrgust lühise puhul mootori klemmidel, lüliti *2* võib aga olla arvutatud ainult mootori nimivoolule.

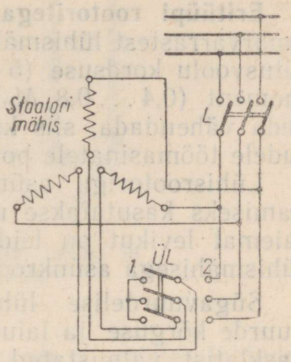
Käivitamine autotrafo abil (joon. 28-6). Autotrafo abil madaldatakse tavaliselt asünkroonmootori klemmidel pinget kuni $(0{,}45 \ldots 0{,}75)\,U_n$. Käivitamine toimub siin joonisel 28-6 näidatud skeemi järgi: algul lülitatakse sisse õlilüliti *3* ning õlilüliti *1* sisselülitamisega käivitatakse asünkroonmootor madaldatud pingel. Pärast käivitusprotsessi lõppu lülitatakse õlilüliti *3* välja ja samaaegselt lülitatakse õlilüliti *2* sisse, millega mootor saab toite otse võrgust. Võimalikud vead lülitamisel hoitakse ära vastava blokeeringuga.

Kui autotrafo ülekandetegur on k_A, siis käivitusvool mootoris väheneb k_A korda ja käivitusmoment k_A^2 korda. Võrgust tarbitav

vool väheneb samuti k_A^2 korda, sest autotrafo primaar- ja sekundaarvoolud on vahekorras $1 : k_A$. Seega seisab autotrafo eelis sel-



Joon. 28-6. Asünkroonmootori autotrafo abil käivitamise põhimõtteskeem

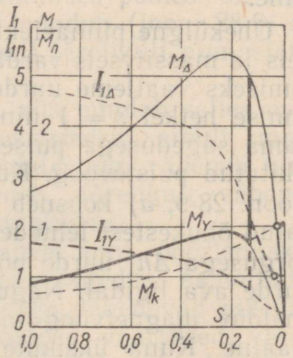


Joon. 28-7. Asünkroonmootori käivitamine staatori mähise lülitamisega tähest kolmnurka

les, et võrreldes reaktoriga on sama käivitusmomendi ja mootori käivitusvoolu juures voolutõuge võrgus autotrafo kasutamise puhul k_A korda väiksem.

Lüliti *1* peab antud juhul olema arvutatud avariivoolude väljalülitamisele, lülitid *2* ja *3* aga nimivooludele.

Käivitamine staatori mähise lülitamisega tähest kolmnurka (joon. 28-7). Antud käivitusviisi korral peab staatori mähis omama normaalskeemina kolmnurkühendust (näiteks 380/220 V mootori töötamisel 220 V võrgust). Käivitamise perioodiks lülitatakse staatori mähis ümber lüliti *ÜL* abil tähte (asend 1), mistõttu faasipinge ja -vool vähenevad $\sqrt{3}$ korda, liinivool aga 3 korda, võrreldes kolmnurkühendusega. Pärast käivitamisperioodi lõppu lülitatakse staatori mähis kolmnurka (*ÜL* asend 2). Kuna käivitusmoment on võr-



Joon. 28-8. Asünkroonmasina voolu ja pöördemomendi kulg tähest kolmnurka lülitamisel

deline pinge ruuduga, siis antud käivitusviisi korral väheneb moment 3 korda. Joonisel 28-8 on näitena toodud staatori voolu ja pöördemomendi ajaline kulg täht-kolmnurk-käivitiga käivitamisel.

28-6. SÜGAVUURDELISE LÜHISROOTORIGA ASÜNKROONMOOTOR

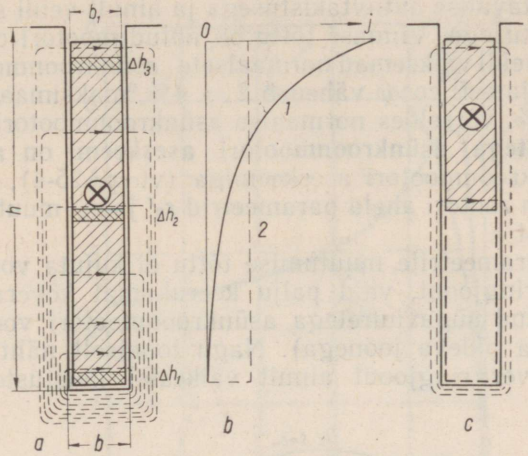
Eritüüpi rootoritega mootorid. Tavalise lühisrootoriga (ühe ümarvarrastest lühismähisega) asünkroonmootoritel on suure käivitusvoolu kordsuse ($5 \ldots 7\ I_n$) juures suhteliselt väike käivitusmoment ($0{,}4 \ldots 0{,}8\ M_n$). Kui suure käivitusvoolu tõttu on vaja seda vähendada, siis käivitusmoment väheneb veelgi. Väga paljudele töömasinatele pole niisugused käivitusmomendid sobivad.

Lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitusomaduste parandamiseks kasutatakse neis erikonstruktsiooniga rootoreid. Kõige laiemat levikut on leidnud sügavuurdelïste ja kaksikvarrastega lühismähisega asünkroonmootorid.

Sügavuurdelise lühisrootoriga asünkroonmootori uurdeisse (uurde kõrguse ja laiuse suhe on suurem kui 5) on paigutatud vasklatist valmistatud mähis. Niisuguse lihtsa konstruktsiooni juures on sügavuurdelistel lühisrootoriga asünkroonmootoritel paremad käivituskarakteristikud kui ümarvarrastega mootoritel, kuid seejuures halveneb veidi nende võimsustegur.

Töötamispõhimõte. Sügavuuretega asünkroonmootori käivitusomaduste parandamise põhimõte seisab kõrgetes (enam kui 2 cm) lühisvarrastes esineva pinnaefekti ärakasutamises. Teatavasti ei ole pinnaefekti puhul juhtme ristlõikes voolutihedus ühtlane ning seetõttu juhtme aktiivtakistus suureneb. Rootori mähise aktiivtakistuse suurenemisega kaasub aga käivitusmomendi suurenemine.

Ühekülgne pinnaefekt on sügavaisse uurdeisse paigutatud kõrgeis ja massiivseis vardais tingitud uurde puistevoost. Selle selgitamiseks vaatleme uurde puistevoo pilti joonisel 28-9, *a*. Käivitamise hetkel $s = 1$ ning rootori voolu sagedus $f_2 = f_1 = 50$ Hz. Sama sagedusega pulseerib ka rootori voolu poolt varda ümber tekitatud puistevoog. Kujutame ette, et sügavuurdes asuv varras (joon. 28-9, *a*) koosneb lõpmata paljudest üksteisega hästi ühendatud õhukestest lehtedest, milledest joonisel on näidatud üks leht kõrgusega Δh_1 uurde põhjas, teine Δh_2 uurde keskel ja kolmas Δh_3 uurde ava ligidal. Nagu näha jooniselt, on uurde alumises osas ahelduv magnetvoog maksimaalne, uurde ava juures aga minimaalne. Kuna üksikute lehekeste poolt moodustatud juhtmete induktiivtakistused on võrdelised neid aheldava magnetvooga ($x = \omega L = \omega \frac{\Phi}{i}$), siis järelikult uurde põhjas asuvad lehekesed omavad maksimaalset ja uurde ava juures asuvad lehekesed mini-



Joon. 28-9. Sügavuurde puistevälja jaotus ja voolutiheduse jaotus juhtmes

maalset induktiivtakistust. Seepärast on varda alumistes lehtedes vool tunduvalt nõrgem kui ülemistes lehtedes, mistõttu ka voolutihedus *j* (amprite arv ühe pinnaühiku kohta) on varda allosas palju väiksem kui ülemises osas. Seega surutakse vool varda alumisest osast ülemisse. Näitlik voolutiheduse jaotus sügavuurdes asuvas vardas on toodud joonisel 28-9, *b* kõveraga *1*. Punktiiriga näidatud ristkülik *2* vastab voolutiheduse ühtlasele jaotusele kogu varda kõrguse ulatuses.

Selleks et vastata küsimusele, kuidas muutuvad varda aktiiv- ja induktiivtakistus voolutiheduse ebaühtlase jaotuse korral, oletame, et voolutiheduse väärtus varda alumises pooles on null. Seega võib kujutleda, et see osa vardast puudub (joon. 28-9, *c*). Kuna seejuures varda ristlõige väheneb, siis järelikult pinnaefekti mõjul varda aktiivtakistus suureneb.

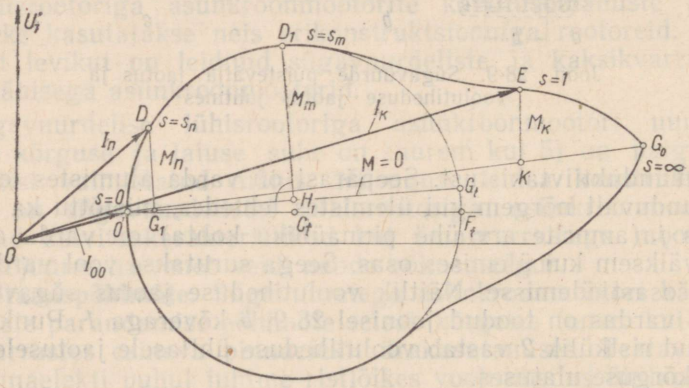
Kui uurde alumine osa on vooluvaba, siis puudub selles osas ka puistemagnetväli. Puistemagnetväli eksisteerib ainult uurde ülemises osas. Seega pind, mida läbib puistevoog, väheneb ning magnetiline takistus sellele voole suureneb. Järelikult väheneb pinnaefekti mõjul rootori mähise induktiivtakistus.

Asünkroonmootori käivitamisel väheneb koos pöörlemiskiiruse suurenemisega pidevalt rootori voolu sagedus, saavutades nimiolukorras väärtuse $f_2 = 1 \ldots 3$ Hz. Seega vähenevad pidevalt puistevoo poolt põhjustatud induktiivtakistuse väärtused varda kõrguse ulatusel ning ühes sellega ka pinnaefekti mõju. Järelikult väheneb mootori käivitamisel pidevalt varda aktiivtakistus. Nimikiirusel on rootori voolu madala sageduse tõttu pinnaefekt tühiselt väike ning masin kujutab endast lühisrootoriga asünk-

roonmootorit tavalise aktiivtakistusega ja ainult veidi suurendatud induktiivtakistusega. Viimase tõttu on antud mootori cos φ ja ülekoormatavus veidi väiksemad normaalsete asünkroonmootorite vastavatest näitajatest: cos φ väheneb 2 ... 4%, maksimaalne moment aga 10 ... 20%, võrreldes normaalse asünkroonmootoriga.

Sügavuuretega asünkroonmootori aseskeem on analoogiline tavalise asünkroonmootori aseskeemiga (vt. p. 25-4), ainult selle vahega, et siin rootori ahela parameetrid r_2' ja x_2' muutuvad olenevalt libistusest s.

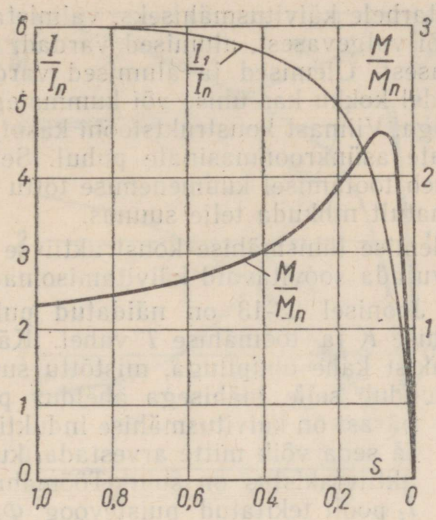
Rootori parameetrite muutumise tõttu ei kujuta voolude kohakõver enam ringjoont, vaid palju keerukamat kõverat. Joonisel 28-10 on toodud sügavuuretega asünkroonmootori voolude kohakõver (jämeda pideva joonega). Nagu jooniselt nähtub, kujutab voolu kohakõver ringjoont ainult väikestel libistustel ($s \ll s_m$).



Joon. 28-10. Sügavuuretega asünkroonmootori voolude kohakõver

Tüüpiliste omadustega sügavuuretega asünkroonmootori staatori voolu ja pöördemomendi sõltuvus libistusest on toodud joonisel 28-11. Staatori vool I_1 ja pöördemoment M on toodud suhtena nende nimisuurustesse I_n ja M_n.

Tavaliselt on sügavuuretega rootoriga asünkroonmootorite käivitusvoolu kordsus $k_i = 4{,}5 \ldots 6$ ja käivitusmomendi kordsus $k_m = 1 \ldots 1{,}6$, samal ajal kui ümarvarrastega asünkroonmootorite korral vastavad näitajad omavad väärtusi $k_i = 5 \ldots 7$, $k_m = 0{,}4 \ldots 0{,}8$. Nagu juba eespool oli märgitud, saavutatakse k_m suurenemine cos φ ja M_m mõningase vähenemise arvel.



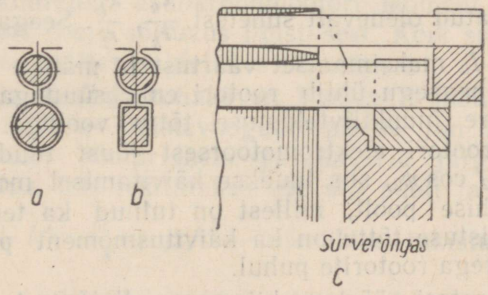
Joon. 28-11. Sügavuuretega asünkroonmootori staatori voolu $\frac{I_1}{I_n}$ ja pöördemomendi $\frac{M}{M_n}$ sõltuvus libistusest

28-7. KAKSIKUURETEGA LÜHISROOTORIGA ASÜNKROONMOOTOR

Kaksikuuretega lühisrootorite konstruktsioonid esitas M. Dolivo-Dobrovolski juba 1893. a.

Üks kaksikuuretega lühismähise konstruktsioon on näidatud joonisel 28-12.

Lühismähise ülemisi vardaid, mida nimetatakse vastavalt

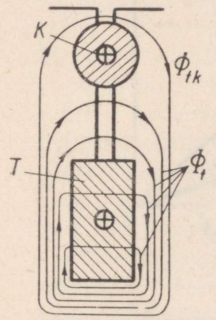


Joon. 28-12. Kaksikuuretega lühismähise konstruktsioon

nende talitlusotstarbele käivitusmähiseks, valmistatakse tavaliselt ümarpronksist või valgevasest, alumised vardad, nn. töömähis — ümar- või lattvasest. Ülemised ja alumised vardad võivad olla ühendatud külgedel kokku kas ühise või kummalegi lühismähisele eraldi lühisrõngaga. Viimast konstruktsiooni kasutatakse pika rootoriga ja võimsate asünkroonmasinate puhul. Sel puhul kumbki mähis, mis pikeneb töötamisel kuumenemise tõttu erinevalt, omab võimalust sõltumatult nihkuda telje suunas.

Alumise ja ülemise lühismähise konstruktiivse kujundamisega on võimalik saavutada soovitavaid käivitamisomadusi.

Tööpõhimõte. Joonisel 28-13 on näidatud puistevoo jagunemine käivitusmähise K ja töömähise T vahel. Käivitusmähis on eraldatud rauapakist kahe õhupiluga, mistõttu suure magnetilise takistuse tõttu puudub selle mähisega ahelduv puistevoog. Seepärast on käivitusmähise induktiivtakistus väike ja seda võib mitte arvestada, kuid selle mähise aktiivtakistus on suur. Töömähist läbiva voolu I_t poolt tekitatud puistevoog Φ_t, mis on aheldatud ainult töömähisega, on suur, sest sellele voole kujuneb magnetiline takistus väikeseks, kuna see kulgeb läbi kitsa ja kõrge pilu kahe mähise vahel. Seetõttu on töömähise induktiivtakistus suhteliselt suur. Kadude vähendamiseks valmistatakse see mähis väikese aktiivse takistusega.

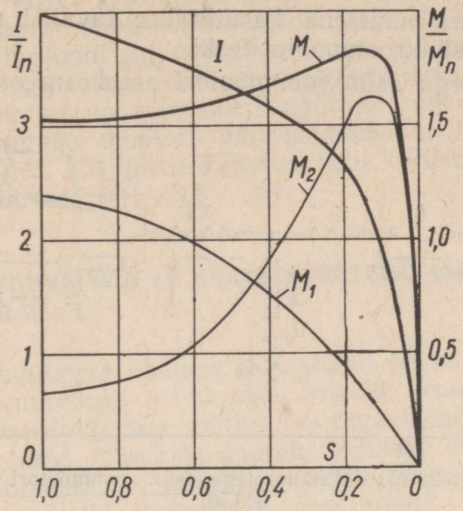


Joon. 28-13. Kaksikuuretega lühismähise puistevoo jagunemine

Peale ülalmärgitud puistevoogude eksisteerib veel töö- ja käivitusmähist läbiva voolude I_t ja I_k poolt tekitatud ühine puistevoog Φ_{tk}, mis aheldub mõlema mähisega.

Käivitamise hetkel on rootori voolu sagedus f_2 võrdne võrgusagedusega f_1, mistõttu töömähise induktiivtakistus omab maksimaalset väärtust. Voolud käivitus- ja töömähistes I_k ja I_t jagunevad pöördvõrdeliselt nende takistustega ja on rootori emj. suhtes faasis nihutatud olenevalt suhetest $\frac{x_k}{r_k}$, $\frac{x_t}{r_t}$. Seega omab käivitusmähise vool I_k maksimaalset väärtust ja mähise suure aktiivtakistuse tõttu peaaegu ühtib rootori emj. suunaga. Töömähise vool I_t on suure induktiivtakistuse tõttu vooluga I_k võrreldes väike ja jääb rootori elektromotoorsest jõust tunduvalt maha. Kuna $M \equiv E_2' I_2' \cos \psi_2$, siis luuakse käivitamisel moment peamiselt käivitusmähise poolt, millest on tulnud ka tema nimetus. Suure aktiivtakistuse tõttu on ka käivitusmoment palju suurem kui ümarvarrastega rootorite puhul.

Asünkroonmootori pöörlemiskiiruse suurenemisel rootori voolu sagedus langeb; väheneb ka töömähise induktiivtakistus ja seega



Joon. 28-14. Kaksikuuretega asünkroonmootori suhteline vool ja pöördemoment sõltuvalt libistusest

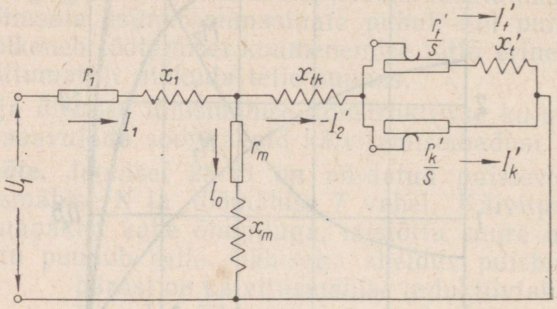
suureneb töömähist läbiva aktiivvoolu komponent ning suureneb tema poolt tekitatud pöördemoment. Nimikiirusel on voolud I_k ja I_t ligikaudu pöördvõrdelised nende aktiivtakistustega r_k ja r_t, sest induktiivtakistused on madala sageduse tõttu väga väikesed. Kuna käivitusmähise aktiivtakistus on palju suurem kui töömähise takistus (suurema käivitusmomendi saavutamiseks), siis normaalses töörežiimis läbib vool peamiselt töömähist, mille poolt praktiliselt luuaksegi pöördemoment.

Esitatu on illustreeritud joonisel 28-14 näidatud kõveratega. Siin M_1 on käivitusmähise poolt tekitatud momendi sõltuvus libistusest, M_2 — töömähise poolt loodud momendi kulg, M — summaarne kaksikuuretega asünkroonmootori moment $M = M_1 + M_2$ ja I — staatori voolu sõltuvus libistusest. Kõik suurused on toodud näitlikkuse mõttes suhtelistes ühikutes.

Aseskeem ja voolude kohakõver. Vastavalt joonisel 28-13 näidatud rootorimähise puistevoogude pildile on kaksikuuretega asünkroonmootori rootoriahela parameetrid järgmised: x_{tk} — induktiivtakistus, mis tekitatakse voo Φ_{tk} poolt ja on ühine voolule $I_2' = I_k' + I_t'$; $\frac{r_t'}{s} + jx_t'$ — töömähise takistus, mida läbib töövool I_t; $\frac{r_k'}{s}$ — käivitusmähise takistus (käivitusmähise induktiivtakistusest võime selle väiksuse tõttu loobuda), mida läbib

vool I_k. Staatori mähisena kasutatakse tavalisi mähiseid nagu normaalsetes asünkroonmootoriteski.

Kaksikuuretega asünkroonmootori aseskeem on näidatud joonisel 28-15.

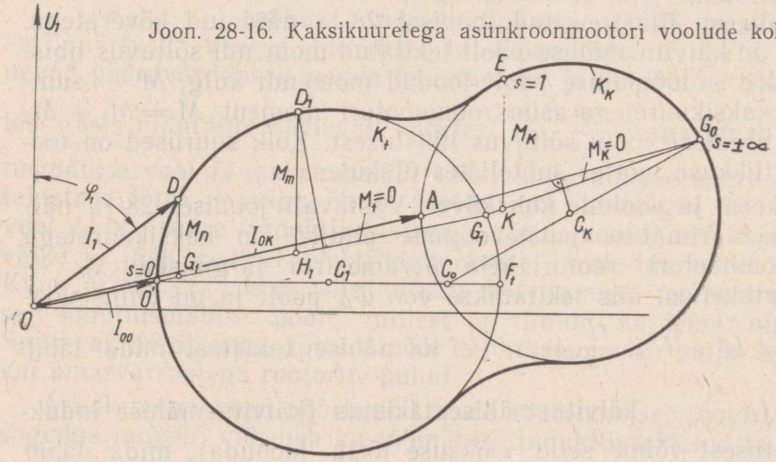


Joon. 28-15. Kaksikuuretega asünkroonmootori aseskeem

Aseskeemi sekundaarpoolel on kaks paralleelharu — vastavalt kahele sekundaarmähisele. Selles suhtes meenutab aseskeem kolme mähisega transformaatori aseskeemi, kus on samuti kaks sekundaarahelat. Kaksikuuretega mootori aseskeemi sekundaarpoolel on mõlemale ahelale ühine induktiivtakistus x_{tk}, mis on tingitud kahe rootorimähise ühisest puistevoost. Ühiste lühistavate rõngaste puhul esineb aseskeemis veel mõlemale harule ühine aktiivtakistus. Olgu märgitud, et ühiseid lühistavaid rõngaid kasutatakse väga harva.

Kaksikuuretega mootori voolude kohakõveraks pole ringjoon,

Joon. 28-16. Kaksikuuretega asünkroonmootori voolude kohakõver



vaid keerukam kõver (joon. 28-16), mis koosneb voolude kohakõverast (ringdiagrammist) käivitusolukorrale K_k ja tööolukorrale K_t ning neid ringjooni sujuvalt ühendavast joonest.

Kaksikuuretega asünkroonmootori rootorimähise vastava konstruktsiooni valimisel on võimalik saavutada soovitavaid käivitusomadusi. Niisuguse mootori käivitusmomendi kordsus kõigub 1,0 ... 2,0 piirides, kusjuures käivitusvoolu kordsus omab suhteliselt väikesi väärtusi ($k_i = 3{,}5 \ldots 5$).

28-8. SÜGAVUURETEGA JA KAKSIKUURETEGA ASÜNKROONMOOTORITE VÕRDLUS

Tootmistehnoloogia lihtsuse seisukohalt on hõlpsamini valmistatavad sügavuuretega asünkroonmootorid. Kuid rootorimähiste mehaanilise vastupidavuse mõttes on tugevamad kaksikuuretega asünkroonmootorid. Viimaste suureks eeliseks on ka asjaolu, et käivitus- ja töömähise parameetrite (aktiiv- ja induktiivtakistuste) valikuga on võimalik saavutada soovitavaid käivitusomadusi, mille saavutamine sügavuuretega asünkroonmootorite korral on palju raskem.

Üldiselt on sama võimsuse ja pöörlemiskiirusega asünkroonmootorite korral kaksikuuretega mootorite käivitusmomendi kordsus suurem, kuid käivitusvoolu kordsus väiksem sügavuuretega mootorite vastavatest näitajatest.

Tabel 28-3

Lühisrootoritega mootorite võrdlus

	Kaksikuuretega lühisrootor			Ümarvarrastest lühisrootor
$\frac{M_k}{M_n}$	2,0	1,5	1,0	0,3
$\frac{I_k}{I_n}$	5 ... 4,5	3,8 ... 3,5	3,5 ... 3,2	6 ... 7

Tabelis 28-3 on toodud k_m ja k_i võrdlevad suurused tehases «Elektrosila» toodetavate kaksikuuretega asünkroonmootorite ja lihtsa ümarvarrastega lühismähisega asünkroonmootorite kohta.

Tabelis 28-4 on toodud võrdlevad andmed kolme ühesuguse staatoriga, kuid erineva rootoriga asünkroonmootorite kohta, mille nimiandmed on järgmised: võimsus 15 kW, primaarpinge 380 V ja sünkroonpöörlemiskiirus sagedusel $f = 50$ Hz $n_1 = 1500$ p/min.

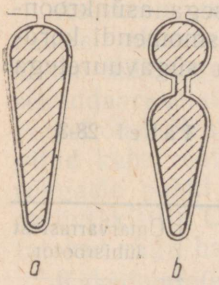
Nagu nähtub tabelist 28-4, on kaksikuuretega asünkroonmootori käivitusmomendi kordsus palju suurem, käivitusvoolu kord-

Tabel 28-4

Lühisrootoritega mootorite andmeid

Rootori lühismähise kuju	η %	cos φ	$\frac{M_k}{M_n}$	$\frac{I_k}{I_n}$
Ümarvarrastest lühismähis	90,7	0,925	1,03	6,26
Kaksikuurdeline lühismähis	89,6	0,85	2,24	3,91
Sügavuurdeline lühismähis	89,7	0,86	1,45	3,97

sus aga väiksem lihtsa ümarvasest lühismähisega asünkroonmootori ja sügavuuretega asünkroonmootori vastavatest näitajatest. Peale selle nähtub veel, et kaksikuuretega ja sügavuuretega asünkroonmootorite paremad käivitusomadused, võrreldes lihtsa ümarvasest lühismähisega asünkroonmootoriga, saavutatakse nimetatud mootorite võimsusteguri ja kasuteguri mõninga vähenemisega nimivõimsusel.



Joon. 28-17. Lühismähise konstruktsioone

Peale sügav- ja kaksikuuretega varustatud rootorite kasutatakse veel modifikatsioone, mis omavad eespool nimetatud mootoritega sarnaseid käivitusomadusi. Näiteks alumiiniumvalu teel valmistatud lühismähise puhul leiavad laialdast kasutamist joonisel 28-17, *a* ja *b* näidatud uuretega rootorid. Tänapäeval toodetavad asünkroonmootorid võimsusega kuni 100 kW on varustatud nimelt sellist tüüpi uuretega lühisrootoriga, mispärast nende käivitusomadused on üldiselt head. Selles võib veenduda tabelis 28-1 ja 28-2 toodud andmete põhjal.

Kiirekäigulistes asünkroonmootorites (tavaliselt $2p = 4$ korral, harvem $2p = 2$ või 6 korral) kasutatakse viimasel ajal tehases «Elektrosila» joonisel 28-18, *a* näidatud kujuga vasklatist lühismähiseid, mida nimetatakse «pudelikujulisteks». Selle mähise valmistamistehnoloogia on palju lihtsam kaksikuuretega lühismähise omast. Tabelis 28-5 on toodud võrdlusandmed tehases «Elektrosila» valmistatud asünkroonmootori 700 kW, 3000 p/min kohta, kus pudelikujulise lühisvarrastega lühisrootorit on võrreldud sügavuurdelise lühismähisega ja lihtsa ümarvardast lühismähisega rootoriga. Nagu nähtub toodud andmeist, on pudelikujulise lühismähisega asünkroonmootori töö- ja käivitusomadused head ega jää maha sügavuurdelise asünkroonmootori vastavaist andmeist. Peale lihtsa valmistamistehnoloogia omab niisu-

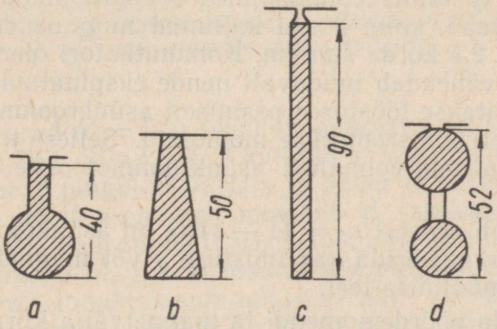
gune mähis veel lisaks head mehaanilist vastupidavust, mistõttu need mähised on viimasel ajal leidnud laialdast kasutamist, eriti suurema võimsusega asünkroonmootorites.

Tabel 28-5

Mitmesuguste mähistega mootori 700 kW, 3000 p/min võrdlusandmed

Rootori lühismähise kuju	η %	cos φ	s %	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{I_k}{I_n}$	$\frac{M_k}{M_n}$
Pudelikujuline lühismähis	92,4	0,885	1,20	1,7	5,2	1,0
Sügavuurdeline lühismähis	92,4	0,88	1,19	1,7	4,9	1,0
Ümarvarrastest lühismähis	92,9	0,875	0,72	1,65	4,75	0,6

Samaks otstarbeks kasutatakse sageli ka kiilukujulise vardaga lühismähiseid (joon. 28-18, *b*).



Joon. 28-18. Pudelikujuline varras (*a*), kiilukujuline varras (*b*), tavaline sügavuurde varras (*c*) ja kaksikvarras (*d*), mis põhjustavad võrdseid algpöördemomente

Selleks et saada ettekujutust üksikute lühismähiste efektiivsusest, on joonisel 28-18 näidatud ühesuurust algpöördemomenti tekitava pudelikujulise varda, kiilukujulise varda, tavalise sügavuurde varda ja kaksikvarraste ristlõiked.

ASÜNKROONMOOTORI KIIRUSE REGULEERIMINE. PIDURDAMINE

29-1. ASÜNKROONMOOTORI KIIRUSE REGULEERIMISE VIISID

Tööstusprotsesside üha laienev automatiseerimine nõuab elektriajameid, mille kiirust oleks võimalik suurtes piirides reguleerida. Niisugustele nõuetele vastab kõige enam ajam, milles mootorina kasutatakse alalisvoolumootorit. Kuid vaatamata sujuvale kiiruse reguleerimise võimalusele on alalisvoolumootorite kasutamine tööstuses piiratud, sest nad on kallimad, vajavad voolu alaldavaid seadmeid, nõuavad suuremat järelevalvet ekspluateerimisel jne.

Üldkasutatava alalisvoolumootori seeria ПН tehnilis-ökonoomiliste näitajate võrdlemine üleliidulise lühisrootoriga asünkroonmootorite seeriaga A näitab, et ühesuguse võimsuse ja pöörlemiskiiruse korral on alalisvoolumootorid asünkroonmootoreist 1,5 ... 2 korda raskemad, kolm korda kallimad ning nende hoomoment (GD^2) on 2 ... 2,5 korda suurem. Kommutaatori olemasolu alalisvoolumasinail vähendab tunduvalt nende ekspluatatsioonikindlust. Seetõttu kasutatakse tööstuses peamiselt asünkroonmootoreid, seejuures peamiselt lühisrootoriga mootoreid. Sellest tingituna uuritakse üksikasjaliselt võimalusi asünkroonmootorite kiiruse reguleerimiseks.

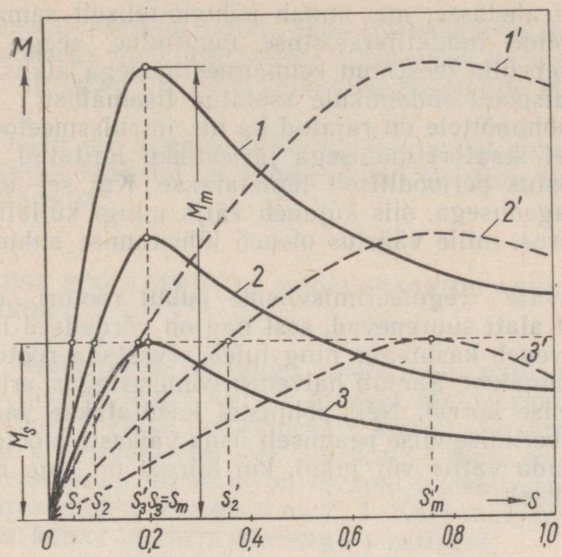
Nagu nähtub seosest $n_2 = (1 - s)n_1$, on asünkroonmootori kiirust võimalik reguleerida kas libistuse s või magnetvälja pöörlemiskiiruse n_1 muutmise teel.

Mingi kindla pöördemomendi ja magnetvälja kiiruse juures on libistust võimalik muuta 1) primaarpinge muutmisega (joon. 29-1) või 2) staatori või rootori vooluahela induktiiv- ja aktiivtakistuste muutmisega (vt. avaldis 26-7).

Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine magnetvälja pöörlemiskiiruse muutmisega on võimalik: 1) toitevoolu sageduse muutmisega ja 2) mootori pooluspaaride arvu muutmisega. Allpool vaatleme üksikuid kiiruse reguleerimise viise lähemalt.

29-2. ASÜNKROONMOOTORI KIIRUSE REGULEERIMINE PRIMAARPINGE MUUTMISEGA

Nagu nähtub asünkroonmootori momendi avaldisest (26-5), muutub momendi suurus võrdeliselt primaarpinge ruuduga. Primaarpinge suurust koormusel võib reguleerida kas aktiiv- või induktiivtakistustega staatori ahelas, reguleeritava trafoga või induktsioonregulaatoriga. Primaarpinge madaldamisel võtavad



Joon. 29-1. Asünkroonmootori pöördemomendi kõverad erinevatel primaarpingetel

momendikõverad $M = f(s)$ üksikuil pingeastmeil kuju, mis on toodud joonisel 29-1. Siin kõver *1* kujutab pöördemomendi kulgu nimipingel, kõver *2* pingel $U_1 < U_{1n}$ ja kõver *3* piirpingel $U_1 \ll U_{1n}$, mil mootori poolt arendatav moment M tasakaalustub staatilise momendiga M_s vääratuslibistusel. Jooniselt näeme, et kui püsiva koormusmomendi M_s korral madaldada pinget reguleeritava pingega trafo või induktsioonregulaatori abil, siis suureneb libistus väärtuselt s_1 nimipingel kuni väärtuseni s_m piirpingel $U_1 < U_{1n}$. Kuna nimilibistuse ja vääratuslibistuse väärtused normaalmasinatel ei ületa $s_n = 0{,}05$ ja $s_m = 0{,}2$, siis antud moodus võimaldab reguleerida kiirust väga väikestes piirides $n_{2n} = n_1(1 - 0{,}05) = 0{,}95n_1$ kuni $n_2 = n_1(1 - 0{,}2) = 0{,}8n_1$, s. o. ainult 15% ulatuses sünkroonkiirusest.

Kiiruse reguleerimise piire on võimalik laiendada vääratuslibistuse väärtuse suurendamise teel. Faasirootoriga asünkroonmootorite korral võib selleks lülitada rootori ahelasse lisa-aktiivtakistuse, lühisrootoriga asünkroonmootori puhul valmistatakse aga rootori mähis suurema takistusega materjalist. Momendikõverate kulg rootori ahela aktiivtakistuse suurendamisel on joonisel 29-1 näidatud punktiirjoonega. Siin toimub kiiruse reguleerimine piirides s_1' kuni s_m'.

Antud kiiruse reguleerimisviisi üldiseks puuduseks on asjaolu, et pinge langemisel väheneb ka vääratusmoment, seega ka masina ülekoormatavus. Paispooli kasutamise puhul võib ta olla ka lüli-

tatud rootori ahelasse, mis annab põhimõtteliselt samad tulemused. Paispoolide induktiivtakistuse muutmine, seega ka kiiruse muutmine võib olla teostatud eelmagneetimisega alalisvoolu abil, mis läbib paispooli südamikule asetatud lisamähist.

Samale põhimõttele on rajatud ka nn. impulssmeetod, mis seisab selles, et staatori mähisega järjestikku lülitatud aktiiv- või induktiivtakistus perioodiliselt lühistatakse. Kui see toimub küllalt suure sagedusega, siis kujuneb välja mingi küllaltki ühtlane keskmine kiirus, mille väärtus oleneb lühistamise suhtelisest kestusest.

Vaadeldavate reguleerimisviiside puhul rootori elektrilised kaod üldiselt alati suurenevad, sest nad on võrdelised libistusega. Seetõttu halveneb kasutegur ning tuleb arvestada rootori ülekuumenemise võimalust. Samuti halveneb võimsustegur, eriti paispoolide kasutamise korral. Neil põhjustel kasutatakse vaadeldavaid kiiruse reguleerimise viise peamiselt üsna väikeste mootorite puhul (kuni mõnisada vatti) või juhul, kui kiirust on vaja reguleerida vaid lühiajaliselt.

29-3. ASÜNKROONMOOTORI KIIRUSE REGULEERIMINE ROOTORI AHELA AKTIIVTAKISTUSE MUUTMISEGA

Rootori ahela aktiivtakistuse muutmise teel on võimalik kiirust reguleerida vaid faasirootoriga asünkroonmootori korral. Selleks lülitatakse rootori klemmidele reostaadid (reguleeritavad metall- või vedeliktakistid), mis on analoogilised käivitusreostaatidega, kuid on määratud pikaajaliseks töötamiseks.

Aktiivtakistuse viimisega rootori ahelasse suureneb asünkroonmootori vääratuslibistuse väärtus (26-7), kuid jääb muutumata vääratusmoment (vt. p. 26-2). See asjaolu annab võimaluse takistuse abil rootori ahelas reguleerida faasirootoriga asünkroonmootori kiirust nullist kuni nimikiiruseni (vt. joon. 26-2 ja 28-2). Kiiruse reguleerimine toimub siin analoogiliselt käivitusprotsessiga joonise 28-2 järgi, ainult et siin jääb mootor töötama mingi püsiva lisatakistuse juures punktis, kus mootori moment tasakaalustub töömasina takistusmomendiga.

Antud reguleerimisviis on üks lihtsamaid, kuid omab seejuures rida puudusi:

a) mehaanilised karakteristikud on järsult langevad, mis pole sageli lubatav ajami, näit. metallilõikepingi töö seisukohalt;

b) reguleerimispiirkond sõltub mootori koormusest ja väheneb viimase vähenemisel;

c) mootori tühijooksul pole kiiruse reguleerimine võimalik;

d) rootori ahela kaovõimsus on võrdeline reguleerimise ulatusega, mis selgub valemist (25-29).

Vaatamata suurtele kadudele rootori ahelas (eriti väikestel

kiirustel) kasutatakse nimetatud reguleerimisviisi laialdaselt, eriti väikese võimsusega mootorite korral. Kuid vahel kasutatakse seda ka võimsate agregaatide, näit. valtsimisagregaatide kiiruse reguleerimisel.

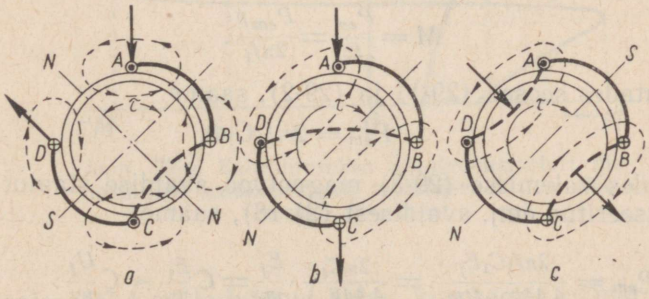
Üldiselt leiab see reguleerimisviis kasutamist juhul, kui tööperiood väikestel kiirustel on lühike ja kui ei nõuta suurt kiiruse reguleerimistäpsust.

29-4. KIIRUSE REGULEERIMINE POOLUSPAARIDE ARVU MUUTMISEGA

Paljudes elektriajamites, nagu metalli- ja puidulõikepingid, tõstukid jne., kus ei nõuta kiiruse pidevat reguleerimist, on võimalik saada teatav väike arv erinevaid kiirusi asünkroonmootori pooluspaaride arvu muutmise teel. Seejuures kiiruse reguleerimine toimub astmete kaupa. Rohkem on levinud kahekiiruselised mootorid, kus kiirusastmete vahekord on 2 : 1. Kuid meie tehaste poolt toodetakse ka kolme ja nelja kiirusega mootoreid.

Staatori ja rootori magnetomotoorsed jõud võivad koos töötada ja luua ühise momendi vaid staatori ja rootori pooluspaaride võrdsuse korral. Seepärast staatori pooluspaaride arvu muutmisel on vaja neid samasuguselt muuta ka rootoris. Faasirootoriga asünkroonmootorites on sel juhul vaja lisakontaktrõngaid, mis tunduvalt suurendab nende gabariiti ja hinda. Lühisrootori mähis aga moodustab automaatselt sama pooluspaaride arvu mis staatori mähisel. Seepärast valmistatakse mitme kiirusega mootorid tavaliselt ainult lühisrootoriga.

Staatori pooluspaaride arvu muutmiseks on kaks võimalust: 1) asetada staatori uurdeisse kaks või enam eri mähist erinevate pooluspaaride arvuga p, ja 2) muuta pooluspaaride arvu staatori mähise üksikute osade ümberlülitamise teel. On võimalikud ka esimese ja teise meetodi kombinatsioonid.



Joon. 29-2. Pooluspaaride arvu muutmine staatori mähise faasipoolte ümberlülitamisega

Staatori mähise pooluspaaride arvu muutmiseks on mitu moodust, milledest sagedamini kasutatakse voolu suuna muutmist ühe faasi mähise erinevates pooltes. Selle põhimõtte selgitamiseks vaatame joonist 29-2. Siin koosneb ühe faasi mähis kahest poolist *AB* ja *CD*, millede kesktelg on nihutatud teineteise suhtes 180°. Loeme poolide algusteks punktid *A* ja *C*. Kui ühendame poolid *AB* ja *CD* järjestikku nii, et esimese pooli lõpp on ühendatud teise pooli algusega (joon. 29-2, *a*), siis, nagu näeme magnetvälja jõujoonte pildist, tekib neli poolust ehk kaks pooluspaari. Poolide *AB* ja *CD* järjestikku ühendamisel pooli lõppude kokkuühendamise teel (joon. 29-2, *b*) tekib kaks poolust (üks pooluspaar). Järjestikku ühendamise asemel võib kasutada ka paralleelühendust (joon. 29-2, *c*).

Mitme kiirusega asünkroonmootorite mähise skeemide võrdlemisel tuleb eelistada selliseid, mis tagavad vajaliku momendi sõltuvuse kiirusest, kusjuures mähise temperatuur ei ületa lubatavaid piire ning mähise väljaviikude ja kontaktide arv on minimaalne.

Üksikute mähise skeemide omaduste kindlaksmääramiseks leiame neid iseloomustava avaldise. Selleks lähtume asünkroonmootori momendi avaldisest kujul

$$M = C_M p \Phi I_2' \cos \psi_2.$$

Rootori mähise soojenemise seisukohast, kui jätta jahutustingimuste muutumine tähele panemata, peab rootori vool I_2' erinevate pooluspaaride arvu korral jääma samaks; $\cos \psi_2$ koormuse muutumisel nullist kuni nimikoormuseni muutub vähe ja on ligikaudu võrdne ühega. Seega antud tingimustel kujuneb pöördemomendi võrrand järgmiseks:

$$M = C_1 \Phi p, \tag{29-1}$$

kus

$$C_1 = C_M I_2' \cos \psi_2.$$

Teiselt poolt

$$M = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{em} p}{2\pi f_1}. \tag{29-2}$$

Võrrutades seosed (29-1) ja (29-2), saame:

$$P_{em} = 2\pi f_1 C_1 \Phi. \tag{29-3}$$

Asetades valemisse (29-3) magnetvoo avaldise staatori mähises indutseeritud emj. avaldisest (21-18), saame:

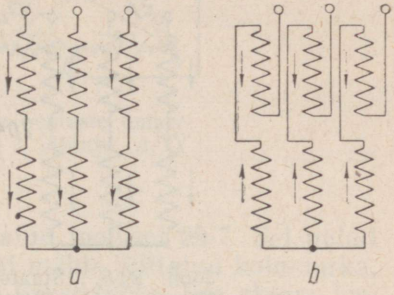
$$P_{em} = \frac{2\pi f_1 C_1 E_f}{4{,}44 k_{w1} f_1 w_1} = \frac{2\pi C_1}{4{,}44 k_{w1}} \cdot \frac{E_f}{w_1} = C \frac{E_1}{w_1} \approx C \frac{U_f}{w_1}. \tag{29-4}$$

Seega antud mõõtmetega asünkroonmasina lubatav elektro-

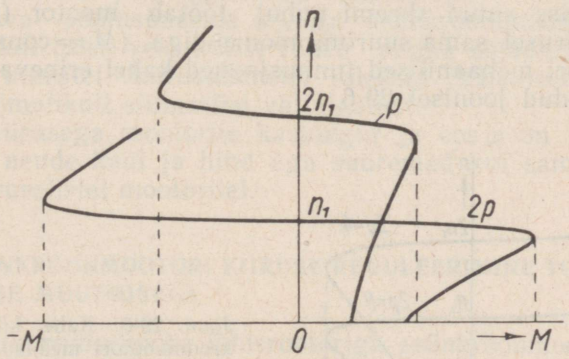
magnetiline võimsus sõltub mistahes pooluspaaride arvu korral faasipinge ja faasimähise järjestikku ühendatud keerdude arvu suhtest.

Vaatleme ülaltoodud mähiste lülitusviise kolmefaasilise masina korral, kasutades mähise kujutamiseks lihtsustatud skeeme.

Joonisel 29-3 on toodud staatori kolmefaasilise mähise poolgruppide järjestikku ühendamise põhimõtteskeem (vt. joon. 29-2, *a* ja *b*). Vasakpoolne skeem (joon. 29-3, *a*), kus mõlemaid faasimähise poolgruppe läbib samasuunaline vool, vastab suurema pooluspaaride arvuga lülitusele. Parempoolse skeemi korral (joon. 29-3, *b*) on pooluspaaride arv võrreldes eelmisega poole väiksem. Mõlema ühendusskeemi korral on mähise keerdude arv ja faasipinge samasugused, mistõttu valemi (29-4) põhjal on mõlemad mähised suutelised arendama sama võimsust. Seega mootor, kus pooluspaaride arvu muudetakse mähise faasigruppide järjestikku ühendamisega, arendab mõlemal kiirusel sama nimivõimsust ($P = \text{const}$).



Joon. 29-3. Staatori mähise poolte ümberlülitamise põhimõtteskeem lülituse Y/Y korral

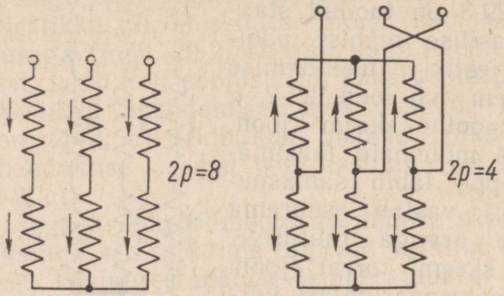


Joon. 29-4. Kahekiiruselise asünkroonmootori mehaanilised karakteristikud töötamisel püsiva võimsusega $P = \text{const}$

Joonisel 29-4 on kujutatud kahe kiirusega asünkroonmootori mehaanilised karakteristikud mootori töötamisel püsiva võimsusega $P = \text{const}$. Püsiva võimsuse säilitamiseks muutub pöörde-

moment üleminekul ühelt kiirusastmelt teisele pöördvõrdeliselt pöörlemiskiirusega.

Pooluspaaride muutmine mähise poolgruppide ühendamisega järjestikku (suurem pooluspaaride arv) ja paralleelselt (väiksem pooluspaaride arv) on toodud joonisel 29-5. Antud põhimõttelise

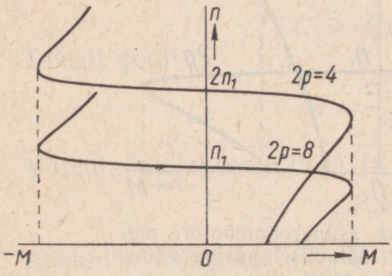


Joon. 29-5. Staatori mähise poolte ümberlülitamise põhimõtteskeem lülituse Y/YY korral

mähiseskeemi ja seose (29-4) põhjal tuleme järeldusele, et üleminekul väiksemalt kiirusastmelt suuremale kasvab võimsus kaks korda, sest

$$\frac{P_{em\,p}}{P_{em\,2p}} = \frac{2U_l}{\sqrt{3}w_1} : \frac{U_l}{\sqrt{3}w_1} = 2.$$

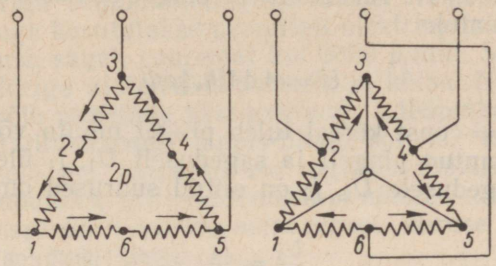
Seega mähise antud skeemi puhul töötab mootor (joon. 29-6) mõlemal kiirusel sama suurima momendiga ($M = \text{const}$). Niisuguse mootori mehaanilised tunnusjooned kahel erineval kiirusastmel on toodud joonisel 29-6.



Joon. 29-6. Kahe kiirusega asünkroonmootori mehaanilised tunnusjooned töötamisel püsiva momendiga $M = \text{const}$

Ülaltoodud mähiseskeemidest vajab joonisel 29-3 toodud skeem kahtteist kontakti ja üheksat väljaviiku, skeem joonisel 29-5 aga kaheksat kontakti ja kuut väljaviiku.

Metallilõikepinkide ajamis on leidnud laialdast kasutamist



Joon. 29-7. Staatori mähise pooluste ümberlülitamise põhimõtteskeem lülituse Δ/YY korral

mootor, mille mähise skeem on näidatud joonisel 29-7. Sel puhul on suurema pooluspaaride arvu korral mähis lülitatud kolmnurka, väiksema pooluspaaride arvu korral kaksiktähte. See skeem loetakse ka töötavaks püsiva nimivõimsusega $P = \text{const}$, ehkki siin võimsuste suhe

$$\frac{P_{emp}}{P_{em\,2p}} = \frac{2U_f}{w_1} : \frac{\sqrt{3}U_f}{w_1} = 1{,}155,$$

s. o. suuremal kiirusastmel suureneb võimsus 15,5% võrra.

Kolme ja nelja kiirusega asünkroonmootoritel on staatoril tavaliselt kaks erinevat mähist. Kumbki mähis võib olla valmistatud lülitusskeemi järgi kolmnurk—kaksiktäht.

Muudetava pooluspaaride arvuga asünkroonmasina mähise skeemi valikul tuleb veel erilist rõhku panna asjaolule, et mmj. kõverad erinevatel kiirusastmetel oleksid sümmeetrilised ja tagaksid võimalikult siinuselist väljajaotust.

Mitme kiirusega mootorite kasutegur ja $\cos\varphi$ on mõnevõrra väiksemad, nende kaal ja hind aga suuremad kui sama võimsusega ühekiiruselistel mootoritel.

29-5. ASÜNKROONMOOTORI KIIRUSE REGULEERIMINE TOITEVÕRGU SAGEDUSE MUUTMISEGA

Üheks ökonoomseimaks lühisrootoriga asünkroonmootorite kiiruse reguleerimise viisiks on tema toitmine reguleeritava sagedusega elektrivõrgust. Et seejuures saada nõutavaid käivitus- ja vääratusmomendi, võimsusteguri ja kasuteguri väärtusi, on koos sagedusega vaja ka reguleerida mootorile rakendatavat pinget. Selle reguleerimisviisi põhiseosed määras kindlaks akadeemik M. P. Kostenko 1925. a.

Selleks et selle kiiruse reguleerimise mooduse korral masina magnetilised koormused ei muutuks, tuleb sageduse muutmisel

reguleerida masinale rakendatavat pinget selliselt, et magnetvoog jääks muutumatuks.

Seosest

$$U = 4{,}44 f k_w w \Phi$$

selgub, et $\Phi = \text{const}$ korral tuleb pinget muuta võrdeliselt sagedusega, s. t. antud pingelt ja sageduselt U_1, f_1 üleminekul uuele pingele ja sagedusele U_2, f_2 on antud suurused omavahel seotud avaldisega:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{f_2}{f_1}. \qquad (29\text{-}5)$$

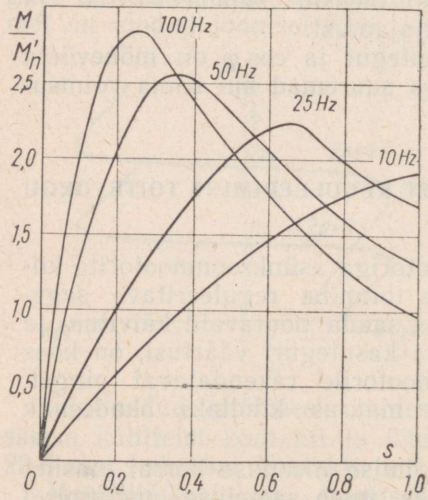
Kiiruse reguleerimisel seose (29-5) järgi nimipöördemoment ($M_n \sim \Phi I_2$) ei muutu, sest $\Phi = \text{const}$, ja rootori vool I_2 praktiliselt ei muutu.

Masina nimivõimsus $P_n = \Omega_n M_n$ suureneb peaaegu võrdeliselt sagedusega, sest sama rakendatud momendi korral nurkkiirus suureneb võrdeliselt sagedusega.

Maksimaalne moment (vt. valem 26-9) sageduse f_1 tõusmisel veidi suureneb, sest valemi (26-9) nimetaja esimene liige ($f_1 r_1$) on võrdeline sagedusega, teine liige ($f_1 x_k$) aga võrdeline sageduse ruuduga. Lugeja suureneb võrdeliselt sageduse ruuduga. Seega antud avaldise lugeja suureneb kiiremini kui nimetaja ja sageduse tõusmisel maksimaalne moment suureneb.

Kriitiline libistus $s_m \approx r_2'/x_k$ väheneb umbes võrdeliselt sagedusega.

Asünkroonmasina pöördemomendi sõltuvus libistusest erinevatel sagedustel on toodud joonisel 29-8.



Joon. 29-8. Asünkroonmootori pöördemomendi sõltuvus libistusest erinevatel sagedustel kiiruse reguleerimisel seose $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ järgi

Lühisrootoriga asünkroonmootori kiiruse reguleerimist sageduse muutmisega kasutatakse peamiselt elektriajamites, mis nõuavad suuri kiirusi, sageli suuremat kui 3000 p/min. Sellistel kiirustel kommutaatoriga alalisvoolumootorid ei kõlba. Niisuguste ajamite näitena võib nimetada käsi-tööriistu ja tööpinke puidutööstusele, käsi-metallitööriistu, täppis-lihvimispinke, ketrusmasinaid tekstiilitööstusele jne. Seda kiiruse reguleerimisviisi kasutatakse ka juhul, kui nõutakse mitme töömasina, näiteks metallivaltsimistsehhi rulltransportööri rullide samaaegset kiiruse reguleerimist ühe ja sama seaduse järgi.

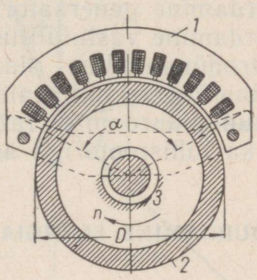
Reguleeritavate asünkroonmasinate toiteallikana võib kasutada järgmisi sagedusmuundajaid:

1) vahelduva kiirusega töötav sünkroongeneraator;
2) asünkroon-sagedusmuundaja;
3) vahelduvvoolu-kommutaatorgeneraatorid ergutamisel staatori poolelt;
4) ioonvaheldajad.

Tänapäeval leiavad rohkem kasutamist sünkroon- ja asünkroon-sagedusmuundajad.

29-6. KAARSTAATORIGA ASÜNKROONMOOTOR

Niisugune mootor erineb tavalisest lühisrootoriga asünkroonmootorist vaid staatori ehituse poolest, mis valmistatakse mitte täisringina ümber rootori, vaid moodustab sellest ainult osa (kaare).



Joon. 29-9. Kaarstaatoriga asünkroonmootori põhimõtteskeem:
1 — tavalise kolmefaasilise mähisega staator; *2* — rootor, milleks võib olla töömasina pöörlev osa; *3* — tugilaager

Kaarstaatoriga asünkroonmootori põhimõtteskeem on toodud joonisel 29-9.

Erinevate kiiruste saavutamise võimalus selgub järgnevast arutelust. Oletame, et meil on tavaline staatori mähis pooluspaaride arvuga p ja siseläbimõõduga D_0. Kui me selle staatori lõikaksime ühest kohast lahti, jättes poolusejaotuse samaks, ja painutaksime ta läbimõõdule D_1, saame mootori, mille tervele ringile tuleks $p\frac{D_1}{D_0}$ pooluspaari. Seega niisuguse kaarstaatoriga asünkroonmootori sünkroonkiirus

$$n_1 = \frac{f}{p} \cdot \frac{D_0}{D_1} = \frac{f}{\pi D_1} 2\tau, \qquad (29\text{-}6)$$

sest $D_0 = 2p\tau$, kus τ — poolusejaotus. Sünkroonkiirus jääb samasuguseks ka juhul, kui on mähitud ainult osa ringi p pooluspaariga.

Seosest (29-6) järeldub, et juhul, kui valida projekteerimisel erinevad poolusejaotuse suurused, saame rida erinevaid sünkroonkiirusi.

Kaarstaatoriga asünkroonmootori puudusteks võib lugeda suhteliselt madalat võimsustegurit ja kasutegurit, mis on seotud elektromagnetiliste nähtustega kaarstaatori otstes.

Kui kaarstaator painutada hoopis sirgeks ning asendada rootor mittemagnetilisest materjalist toruga, milles on mingisugune sulametall, siis saame induktsioon-sulametalli pumba. Surve niisuguses pumbas arendatakse elektromagnetiliste jõudude poolt, mis tekivad metallis indutseeritud voolude ja magnetvälja toimel.

29-7. ASÜNKROONMOOTORI PIDURDAMISE REŽIIMID

Mitmesuguste töömehhanismide töötsükli hulka kuulub ka pidurdamine. Selleks et töötsükli vältus viia miinimumini antud töömehhanismi tööjõudluse tõstmiseks, on vajalik kiire ja täpne pidurdamine. Seda tagab elektrimootorite elektriline pidurdamine. Asünkroonmootorite pidurdamiseks kasutatakse tavaliselt järgmisi pidurdamise viise:

1) pidurdamine generaatorirežiimis energia andmisega võrku;
2) pidurdamine vastulülitusega;
3) elektrodünaamiline pidurdamine, s. o. masina töötamine generaatorina koormatult eraldi seisvale takistusele.

Nimetatud pidurdamise režiimid on kasutatavad nii faasirootoriga kui ka lühisrootoriga asünkroonmootorite korral.

29-8. PIDURDAMINE ENERGIA ANDMISEGA VÕRKU. GENERAATORIREŽIIM

Eespool (p. 20-2) käsitlesime generaatorirežiimi üldisi küsimusi. Allpool käsitleme generaatorirežiimi seoses tema kasutamisega asünkroonajami pidurdamiseks.

Vaatleme lähemalt füüsikalisi protsesse rootori pöörlemisel kiirusega, mis ületab sünkroonkiiruse.

Mootorirežiimis «lõikab» pöördmagnetväli staatori ja rootori mähiseid ühes ja samas suunas, mistõttu staatori ja rootori emj. E_1 ja E_2 on faasis. Generaatori töörežiimis jääb magnetvälja pöörlemise suund staatori mähise suhtes samaks, rootori mähise suhtes aga muutub vastupidiseks, sest rootor pöörleb magnetväljast

kiiremini. Seetõttu rootori emj. märk muutub vastupidiseks, võrreldes mootorirežiimiga. See järeldub ka avaldisest

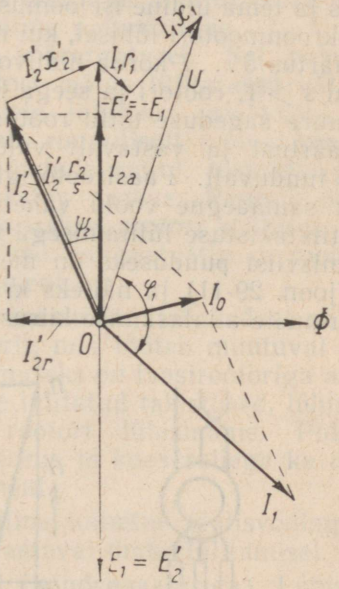
$$E'_{2s} = sE'_2,$$

sest s on nüüd negatiivne.

Kuna rootori voolu aktiivkomponent I_{2a} alati ühtib emj. E_{2s} suunaga, siis generaatori tööolukorras muutub ka tema suund vastupidiseks, võrreldes mootori tööolukorraga. Rootori voolu aktiivkomponendi suuna muutus on tingitud sellest, et moment masina võllil generaatorirežiimis on vastupidine momendi suunale mootorirežiimis. Esimesel juhul rootorit veetakse ringi mingi ajami poolt, teisel juhul aga rootor ise on vedavaks osaks.

Rootori voolu reaktiivkomponendi suund ei muutu, sest asünkroonmasina tööolukorra muutumisel rootori ahela parameetrite iseloom ei muutu.

Generaatorirežiimis töötava asünkroonmasina vektordiagramm joonisel 25-2, *a* toodud aseskeemile on kujutatud joonisel 29-10.



Joon. 29-10. Generaatorirežiimis töötava asünkroonmasina vektordiagramm joonisel 25-2, *a* kujutatud aseskeemile

Antud vektordiagramm näitab, et pinge U ja voolu I_1 vaheline nurk φ_1 on suurem kui 90°, mis vastab töörežiimile, kus voolu I_1 põhjuseks pole mitte U, vaid emj. E_1. Seega staatori mähis töötab generaatorina, andes energiat elektrivõrku.

Pidurdamist energia andmisega võrku kasutatakse tõste-transpordiseadmeis suurte raskuste allalaskmisel. Allalangeva raskuse

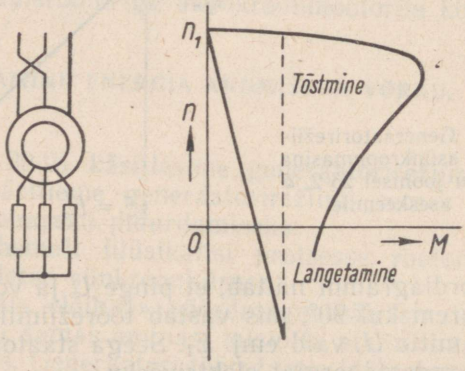
mõjul asünkroonmasina rootor hakkab pöörlema kiiremini sünkroonkiirusest $n > n_1$. Seejuures asünkroonmasin läheb üle generaatori töörežiimi ja arendab pidurdavat momenti. Asünkroonmasina kiirus suureneb piirini, kus masina moment tasakaalustub koormuse momendiga (allalastav raskus) ja edaspidi laskub raskus alla ühesuguse kiirusega $n > n_1$. Kui allalastava raskuse poolt tekitatud moment ületab vääratusmomendi väärtuse generaatorirežiimis, siis masin takistavat momenti ei tekita.

Pidurdamist väiksematel kiirustel on võimalik teostada staatori mähise ümberlülitamisega suuremale pooluste arvule.

29-9. PIDURDAMINE VASTULÜLITUSEGA

Vastulülitusega pidurdamiseks nimetatakse töörežiimi, mil asünkroonmasina rootor pannakse pöörlema töömehhanismi poolt vastu tema magnetvälja pöörlemise suunda. See on teostatav asünkroonmootori ükskõik millise kahe toitejuhtme ümberlülitamise teel. Sellist töörežiimi nimetatakse elektromagnetiliseks pidurdamiseks ja tema üldine iseloomustus on toodud eespool (p. 20-2).

Asünkroonmootori lühisel, kui rootor seisab paigal, ületab tema voolu väärtus 5 ... 7 korda nimivoolu väärtuse. Mootori vastulülitusel, kui $s > 1$, rootori ja seega ka staatori vool tugevneb veelgi veidi. Suure sageduse tõttu rootoris tema induktiivtakistus omab suurt väärtust ja vastavalt valemile (26-5) momendi väärtus väheneb tunduvalt. Faasirootoriga asünkroonmootori korral on võimalik samaaegne voolu vähendamine ja momendi suurendamine aktiivtakistuse lülitamisega rootori ahelasse. Kuid niisuguse pidurdamisviisi puuduseks on mehaaniliste karakteristikute suur kallak (joon. 29-11) ja näiteks kraana puhul on raske saada väikesi koormuste allalaskmise kiirusi ning esineb kiiruste kõikumine



Joon. 29-11. Faasirootoriga asünkroonmootori mehaaniline karakteristik pidurdamisel vastulülitusega

koormuse muutumisel. Vaatamata neile puudustele kasutatakse antud pidurdamisviisi laialdaselt tõste-transpordiseadmete ajamites ning ka teistel juhtudel, näiteks treipinkide seiskamisel.

29-10. DÜNAAMILINE PIDURDAMINE

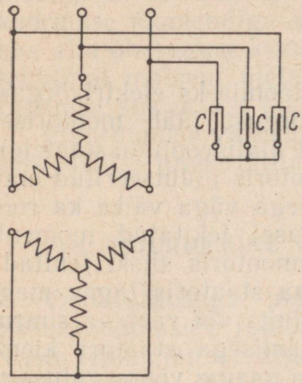
Asünkroonmootor tarbib magnetvälja loomiseks elektrivõrgust magneetimisvoolu. Lahutatuna elektrivõrgust jääb mootorisse vaid nõrk jääkmagnetvoog (analoogiliselt alalisvoolumasinatele). Selle jääkmagnetvälja poolt pöörlevas rootoris indutseeritud emj. ja vool on järelikult väga väikesed ja seega väga väike ka rootori voolu ja jääkmagnetvälja koostegevusel tekitatud moment. Selleks et võrgust lahutatud asünkroonmootoris siiski tekitada vajaliku suurusega momenti, on vaja luua staatoris tugev magnetväli viimase ergutamisel kas alalisvooluga või vastava suurusega mahtuvuste (kondensaatorite) lülitamisega staatori klemmidele. Staatori ergutamisel alalisvooluga saame võõrergutusega dünaamilise pidurdamise. Staatori ergutamisel tema klemmidele lülitatud kondensaatorite poolt tekitatud mahtuvusliku voolu abil tekib endaergutusega dünaamiline pidurdamine.

Pidurdamine alalisvooluga võõrergutusel. Sel puhul toimub pidurdamine järgmiselt. Staatori mähis lülitatakse välja elektrivõrgust ning tema klemmidele juhitakse alalisvool. Staatori mähist läbiv alalisvool tekitab ruumiliselt seisva magnetvälja. Rootor pöörleb näiteks inertsjõudude mõjul, tõstukite puhul aga paneb rootori pöörlema allalastav raskus. Rootori pöörlemisel seisvas magnetväljas indutseeritakse rootori mähises emj., mis kutsub selles esile voolu. Seisva magnetvälja ja rootori voolu poolt tekitatakse pidurdav moment.

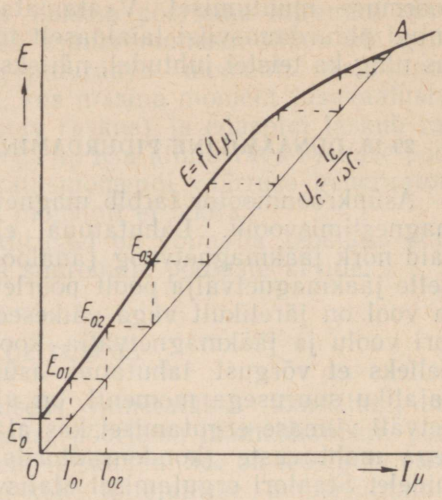
Seega niisugune asünkroonmasin kujutab endast nähtamatute poolustega sünkroongeneraatorit, mis töötab muutuval sagedusel (vt. p. 20-3). Generaatori koormuseks on faasirootoriga asünkroonmootori korral rootori ahelasse lülitatud takistused, lühisrootoriga asünkroonmootori korral aga rootori lühismähis. Pidurdamisel väheneb loomulikult mootori kiirus ja koos sellega ka indutseeritud emj., vool ja pidurdusmoment.

Staatori mähise sümmeetriline toitmine alalisvooluga on võimalik ainult staatori mähise vastaval ümberlülitamisel.

Pidurdamine endaergutusel (kondensaatoriga). Lühisrootoriga asünkroonmootoritega ajamite korral kasutatakse vahel dünaamilist pidurdamist endaergutamisel. Sel korral lülitatakse pidurdamise ajaks staatori klemmidele ergutuskondensaatorid, nagu on näidatud joonisel 29-12. Niisugune masin töötab endaergutusega asünkroongeneraatorina (analoogia alalisvoolu-haruvoolugeneraatoriga). Endaergutuse aluseks on siin rootori jääkmagnetvälja poolt staatori mähises indutseeritud emj. E_0. Kondensaatorite ole-



Joon. 29-12. Ergutuskondensaatoritega asünkroonmootori skeem



Joon. 29-13. Endaergutusega asünkroongeneraatori ergutamisprotsessi graafik

masolu tõttu tekib selle emj. E_0 mõjul staatori mähises mahtuvuslik vool I_0. Voolu I_0 poolt tekitatakse staatori mähises pöördmagnetväli, mis omakorda suurendab elektromotoorset jõudu ja pinget staatori klemmidel. Pinge kondensaatoril tõuseb väärtuseni E_{01}. Selle emj. E_{01} tulemusel (joon. 29-13) suureneb kondensaatori vool suuruseni I_{02}, toimub edasine generaatori emj. suurenemine väärtuseni E_{02} jne. Niisugune alalisvoolu-haruvoolugeneraatoriga analoogiline ergutamisprotsess kestab punktini, kus saavutatakse tasakaal asünkroongeneraatori ja kondensaatori pingete vahel.

Kirjeldatud pidurdusviisi puudusteks on järgmised asjaolud: 1) pidurdusmoment tekib kiirustel, mis on suuremad kui $\left(\frac{1}{3} \dots \frac{1}{2}\right) n_1$, 2) endaergutuse katkemine kriitilisel kiirusel

$$n_{kr} = n_1\left(1 + \frac{r_2'}{r_1}\right)\sqrt{\frac{x_c}{x_1 + x_2'}},$$

kus x_C — kondensaatori mahtuvustakistus, 3) suure mahtuvusega kondensaatorite vajadus vajaliku pidurdusmomendi saavutamiseks väikestel kiirustel.

Selle pidurdusviisi eeliseks on asjaolu, et asünkroonmasina ergutamiseks ei vajata välist energiaallikat.

ASÜNKROONMOOTORI TÖÖ EBANORMAALSETES TINGIMUSTES

30-1. ASÜNKROONMOOTORI EBANORMAALSED TÖÖREŽIIMID

Praktikas kõige sagedamini esinevateks asünkroonmootori ebanormaalseteks töörežiimideks on:

1) töötamine nimipingest erineval pingel;
2) töötamine nimisagedusest erineval sagedusel;
3) töötamine ebasümmeetrilise primaarpingega;
4) töötamine ebasümmeetrilise rootoriahelaga.

Pinge kõikumine elektriliinides on tavaline nähtus, kusjuures on võimalikud ka pikemaajalised pinge langused või tõusud üle nimiväärtuse. Sageduse kõikumist suuremates piirides esineb harvemini.

Ebasümmeetriline pinge esineb võrgus sageli juhtudel, kui on tegemist suure võimsusega ühefaasiliste tarbijatega. Vaadeldava küsimuse seisukohast võib äärmise juhuna käsitada asünkroonmasina töötamist ühe faasi katkemisel (näit. kaitsme läbipõlemine ühes faasis).

Rootori ahela ebasümmeetriat võib põhjustada faasirootoriga asünkroonmootorite korral näit. kontaktrõngaste ja harjade vahelise ühenduse halvenemine, lühisrootoriga asünkroonmootori korral aga näiteks lühisvarraste halb ühendus (defektid lühisvarraste jootmisel lühisrõngaste külge; tühimikud või katkestused varrastes alumiiniumvalu korral).

30-2. ASÜNKROONMOOTORI TÖÖTAMINE NIMIPINGEST ERINEVAL PINGEL

Vaatleme siinkohal asünkroonmootori tööd nimipingest erinevatel pingetel nimisagedusel, mis praktikas esineb kõige sagedamini. Tavaliselt pinge kõikumised $\pm 5\%$ piirides nimipingest loetakse normaalseks ning ГОСТ 183-55 alusel peab mootor niisugustel pinge muutustel olema võimeline töötama nimivõimsusega. Kuid suuremate pinge kõikumiste korral tuleb vastavalt pinge muutumisega muuta ka mootori koormust.

Oletame, et asünkroonmootori töötamisel püsiva koormusmomendiga primaarpinge väärtus vähenes. Seetõttu väheneb ka mootori emj. ja magnetvoog. Mootori pöördemoment, mis sõltub primaarpinge ruudust, väheneb takistusmomendist allapoole. Seetõttu mootori libistus suureneb (pöörlemiskiirus väheneb) väärtuseni, mil mootori moment saavutab tasakaalu koormuse takistusmomendiga (vt. p. 29-2).

Libistuse suurenemisega suureneb ka rootori vool ja selle voolu nihkenurk võrgupinge suhtes (vt. ringdiagrammist).

Pinge langemisel nõrgeneb tühijooksuvool. Staatori vool aga, mis on tühijooksuvoolu ja taandatud rootorivoolu geomeetriline summa, võib seejuures olenevalt koormusest kas tugevneda või nõrgeneda.

Pinge tõusmine mootori klemmidel kutsub esile emj. ja magnetvoo suurenemise. Moment suureneb üle takistusmomendi väärtuse ning mootori libistus väheneb (pöörlemiskiirus suureneb). Libistuse vähenemisel nõrgeneb ka rootori vool. Tühijooksuvool pinge kõrgenemisel tugevneb.

Seega kutsub pinge langemine alati esile rootori voolu tugevnemise, pinge tõusmine aga rootori voolu nõrgenemise. Staatori voolu tugevus aga sõltub tühijooksuvoolu ja rootori voolu suuruste vahekorrast ja võib pinge muutumisel kas suureneda või väheneda. Seega staatori voolu järgi ei saa täielikult otsustada mootori seisukorra üle.

Rootori voolu tugevnemine pinge langemisel kutsub esile rootori liigse soojenemise ning seetõttu pinge langemisel üle 5% nimipingest on vaja vähendada mootori koormust võllil.

30-3. ASÜNKROONMOOTORI TÖÖTAMINE ERINEVATEL SAGEDUSTEL PÜSIVA PRIMAARPINGE JUURES

Ekspluatatsioonis esineb võrgu sageduse kõikumisi, mis elektrivõrgu avariirežiimide puhul võivad ulatuda kuni $\pm 5\%$ nimisagedusest. Jättes tähele panemata pingelangu staatori mähises, võime lugeda, et $U \sim f\Phi$. Seega püsival võrgupingel mootori magnetvoog ja seega ka tühijooksuvool on pöördvõrdelised sagedusega. Mootori puiste-induktiivtakistused x_1 ja x_2' ja magnetvälja pöörlemiskiirus muutuvad võrdeliselt sagedusega.

Vaatame allpool nimipingel ja püsiva nimi-takistusmomendiga töötava asünkroonmootori tööd sageduse vähenemisel. Sageduse vähenemine kutsub esile magnetvoo suurenemise ning kiiruse vähenemise, sest väheneb välja pöörlemiskiirus. Kuna takistusmomendi suurus ei muutu, siis magnetvoo tugevnemise tõttu väheneb rootori vool. Seega vähenevad ka rootori vaseskaod ning libistus, tühijooksuvool aga suureneb. Kuid staatori vool oleneb tühijooksuvoolu ja taandatud rootorivoolu geomeetrilisest summast ja võib seega kas suureneda või väheneda.

Seega sageduse vähenemisel esinevad samasugused nähtused nagu pinge tõusmisel ning vastupidi.

Kui koos sageduse muutumisega muuta ka pinget nii, et $U/f = \text{const}$, nagu seda tehakse asünkroonmootori kiiruse reguleerimisel sagedusega, siis mootori magnetvoog, seega ka tühijooksuvool, rootori ja staatori vool jäävad samasugusteks kui tavalisel töötamiselgi.

30-4. ASÜNKROONMOOTORI TÖÖTAMINE EBASÜMMEETRILISE PRIMAARPINGEGA

Juba võrdlemisi väike primaarpingete ebasümmeetrilisus võib asünkroonmootoris esile kutsuda liigset mähiste soojenemist, kui mootor töötab nimikoormusel või sellele lähedasel koormusel.

Mingi ebasümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi võime lahutada kolmeks sümmeetriliseks süsteemiks, mida nimetatakse päri-, vastu- ja nulljärgnevusega süsteemideks. Pärijärgnevusega süsteemi moodustavad kolm üksteisest 120° võrra nihutatud ühesugust vektorit, mille pöörlemise suund ühtib algsüsteemi vektorite pöörlemise suunaga. Vastujärgnevusega kolmefaasilise sümmeetrilise süsteemi vektorid pöörlevad algsüsteemi vektoritele vastassuunas. Nulljärgnevusega süsteemi vektorid on omavahel võrdsed ja ühtivad faasis. Asünkroonmootori puhul tavaliselt puudub toitejuhtmena nulljuhe, mistõttu nulljärgnevusega süsteemi siin esine. Seega antud pingete U_A, U_B ja U_C absoluutväärtuste järgi võib määrata pärijärgnevusega U_1 ja vastujärgnevusega U_2 süsteemide pinged, arvestades, et pinged U_A, U_B, U_C nulljärgnevusega süsteemi puudumise korral moodustavad summana nulli.

Pingete sümmeetriliste komponentide kohta võime kirjutada avaldised:

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C),$$
$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C), \qquad (30\text{-}1)$$

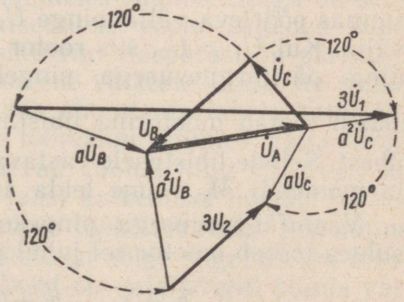
kus

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

on komplekstegur, millega korrutamisel kompleksvektor pöördub nurga 120° võrra vektorite liikumise suunas, kusjuures tema suurus ei muutu. Korrutamisel komplekstegurigа a^2 pöördub vektor samas suunas nurga 240° võrra.

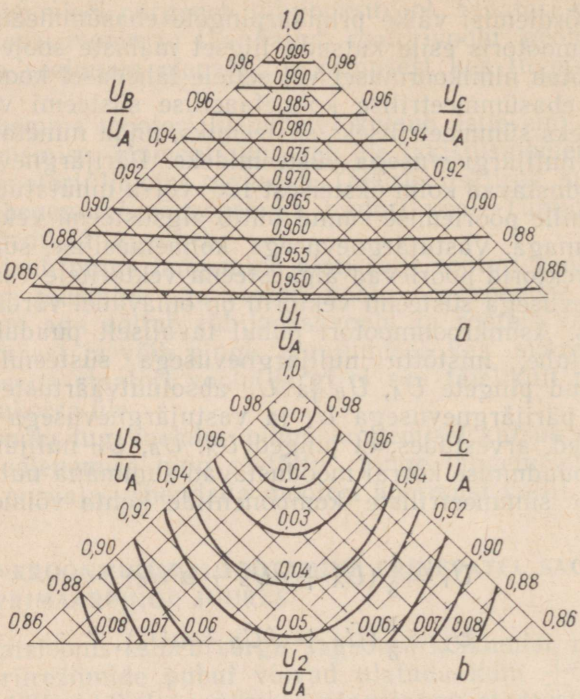
Vastavalt toodud võrranditele (30-1) on joonisel 30-1 esitatud graafiline viis $\dot{U}_1$ ja $\dot{U}_2$ leidmiseks.

Süsteemi ebasümmeetrilisuse iseloomustamiseks kasutatakse suhet U_2/U_1. Juhul kui $U_2/U_1 < 0{,}05$, siis selle suhte määramiseks võib kasutada joonisel 30-2 toodud diagrammi, millest suhete U_B/U_A ja U_C/U_A (U_A —



Joon. 30-1. Pingekomponentide U_1 ja U_2 graafiline määramine, juhul kui $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$

suurim faasipinge) abil määratakse U_1/U_A ja U_2/U_A, seega ka U_1 ja U_2.



Joon. 30-2. Graafikud pingekomponentide U_1 ja U_2 määramiseks (juhul kui $U_2/U_1 < 0{,}05$) süsteemile

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$$

Sümmeetriliste mähistega masina puhul pinge U_1 tekitab pärisuunas pöörleva välja, pinge U_2 aga sellele vastassuunas pöörleva välja. Kui $U_1 > U_2$, siis rootor hakkab pöörlema pärivälja suunas ning pärijärgnevusega pingekomponendi U_1 suhtes asünkroonmasin töötab mootorina libistusel $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, mis on väiksem ühest. Sellele libistusele vastavad voolud staatoris I_1 ja rootoris I_2' ja momendi M_1 võime leida asünkroonmootori ringdiagrammist.

Vastujärgnevusega pingekomponendi U_2 poolt tekitatud välja suhtes töötab mootor sel juhul pidurina libistusel

$$\frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + (n_1 - sn_1)}{n_1} = 2 - s.$$

Pinge U_2 tekitab vastujärgnevusega voolukomponendi staatoris

I_{12} ja rootoris I'_{22} ning momendi. Väikestel libistustel on rootori vastujärgnevusega voolukomponendi sagedus $(2-s)f_1 \approx 2f_1$. Vastujärgnevusega voolukomponendid võivad juba väikese pingete ebasümmeetrilisuse korral omada suuri väärtusi. Näiteks kui $U_2/U_{1n} \cdot 100 = 5\%$, siis I_{12} ja I'_{22} moodustavad nimivoolust I_{1n} umbes 20 . . . 30%.

Päri- ja vastujärgnevusega voolukomponentide I'_2 ja I'_{22} poolt tekitatakse pöördemomendid, mis valemi (26-3) põhjal on võrdelised vastavate voolude ruutudega ja pöördvõrdelised libistustega. Seega pingete ebasümmeetrilisusel $U_2/U_1 = 0{,}05$, kui $I'_{22}/I'_2 = 0{,}3$, on mootori käivitamisel $(s = 1)$ vastu- ja pärijärgnevusega momentide suhe $\left(\frac{I_{22}'}{I_2'}\right)^2 \frac{s}{2-s} = 0{,}3^2 \cdot \frac{1}{2-1} = 0{,}09$, s. o. moment käivitamisel väheneb kõigest 9% võrra. Mootori töötamisel nimimomendiga $(s \approx 0{,}02)$ on see momentide suhe veelgi väiksem.

Tavaliselt esineva pingete ebasümmeetrilisuse korral võib seega töötamisel momendi vähenemist mitte arvestada. Pingete ebasümmeetria kutsub peamiselt esile kaovõimsuse suurenemise mähistes ning seega masina liigse soojenemise.

Staatori ahela ebasümmeetria äärmine juhtum esineb ühe faasijuhtme katkemisel (näit. kaitsme läbipõlemisel). Oletame, et mähis on ühendatud tähte, siis vool mootori ühes faasis on null, näit. $\dot{I}_A = 0$, ning seega $\dot{I}_B = -\dot{I}_C$. Kui niisugusel juhul määrata voolu sümmeetrilised komponendid I_1 ja I_2 analoogiliselt joonisele 30-1, saame $I_1 = I_2$, s. t. meil on tegemist 100%-se ebasümmeetrilisusega. Kui masina rootor seisab $(s = 1)$, siis I_1 ja I_2 tekitavad ühesuguse suurusega, kuid vastupidise suunaga pöördemomendid. Resulteeriv moment võllil on null ja mootor iseseisvalt käima ei hakka.

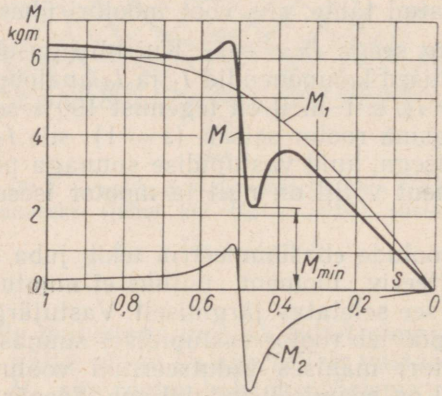
Kui selline voolude ebasümmeetria tekib juba töötava mootori korral, siis resulteeriv moment nulliks ei muutu, kuigi $I_1 = I_2$. Füüsikaliselt on see seletatav järgmiselt. Vastujärgnevusega magnetvälja suhtes pöörleb rootor vastupidises suunas. Seega on selle välja poolt rootori mähises indutseeritud voolu sagedus suur, mistõttu see vool on peamiselt induktiivne. Seepärast on pärijärgnevusega voolu poolt tekitatud moment väikeste libistuste puhul tugevasti ülekaalus ning mootor jääb ühe staatoriahela katkestamise puhul edasi töötama. Selline töörežiim kujuneb väga ohtlikuks, sest faasi katkemisel suurenevad voolud ning vastavalt ka kaod. Seepärast staatoriahela ühe faasi katkemisel mootor tavaliselt kuumeneb kiiresti üle ning muutub töökõlbmatuks. Töötamine kahe faasiga, kui üks faasidest katkeb, on kõige sagedamaks mootorite vigastumise põhjuseks. Seepärast on vaja kõigiti püüda vältida kolmefaasilise mootori töötamist kahefaasilise toitega.

30-5. ASÜNKROONMOOTORI TÖÖTAMINE EBASÜMMEETRILISE ROOTORIAHELA KORRAL

Vaatleme juhtumit, kus rootori ebasümmeetria on tingitud tähte ühendatud mähiste ebaühtlaste faasitakistuste tõttu. Ebaühtlaste faasitakistuste korral on ka voolud üksikutes faasides erinevad. Seda ebasümmeetrilist rootori voolude süsteemi võime lahutada kaheks sümmeetriliseks — pärijärgnevusega ja vastujärgnevusega voolude süsteemiks. Nulljärgnevusega voolukomponenti rootoris ei teki, sest puudub nulljuhe.

Nende kahe sümmeetrilise rootorivoolude süsteemi poolt tekitatakse mmj. ja magnetväljad, mis koos staatori väljadega loovad vastavad pöördemomendid. Analüüsime seda küsimust lähemalt.

Kui rootor pöörleb põhimagnetvälja suhtes libistusega s, siis indutseeritakse rootoris emj. ja vool sagedusega $f_2 = sf_1$. Selle voolu pärijärgnevusega komponendi poolt tekitatud magnetväli liigub rootori suhtes kiirusega $n_1 - n = n_1 - (1 - s)n_1 = sn_1$. Rootori voolu vastujärgnevusega komponendi poolt tekitatud magnetväli liigub rootori suhtes sama kiirusega sn_1, kuid rootori pöörlemisele vastassuunas.



Joon. 30-3. Asünkroonmootori pöördemomendid ebaühtlaste rootori faasitakistuste korral

Rootori voolu pärijärgnevusega komponendi poolt tekitatud magnetväli liigub paigalseisva staatori suhtes kiirusega $n + sn_1 = (1 - s)n_1 + sn_1 = n_1$, s. o. sünkroonselt staatori väljaga, millega koos tekitab mootori pöördemomendi M_1 (joon. 30-3). See moment sarnaneb oma füüsikalise olemuse poolest normaalse töörežiimi juures esineva momendiga. Vastujärgnevusega rootorivoolu komponendi poolt tekitatud magnetväli liigub paigalseisva staa-

tori suhtes kiirusega $n_3 = n - sn_1 = (1 - s)n_1 - sn_1 = (1 - 2s)n_1$ ja indutseerib seal emj. ja voolu I_{13} sagedusega $f_3 = (1 - 2s)n_1 p = (1 - 2s)f_1$. Kuna voolu I_{13} sagedus erineb võrgu sagedusest, siis staatori mähis on selle voolu suhtes nagu lühistatud üle võrgutakistuse, mis on suhteliselt väga väike. Staatori voolu I_{13} ja rootori vastujärgnevusega voolu komponendi poolt tekitatud magnetvälja koosmõjul tekitatakse pöördemoment M_2.

Momendi M_2 muutumise iseloomu selgitamiseks on vaja silmas pidada, et staatori voolu I_{13} suhtes on rootor primaarpooleks, sest ta kutsub antud voolu esile, ja staator sekundaarpooleks.

Kui me ergutaksime mootorit rootori poolelt, lülitades ta võrku ning lühistades staatori mähise, siis rootor hakkab pöörlema rootori magnetvälja pöörlemissuunale vastassuunas. Järelikult, kui rootor on primaarpooleks, siis temale mõjuv mehaaniline moment on staatori suhtes vastusuunaline välja liikumissuunale.

Ebasümmeetrilise rootori puhul rootori vastujärgnevusega voolu poolt tekitatud magnetvälja kiirus staatori suhtes on

$$n_3 = (1 - 2s)n_1.$$

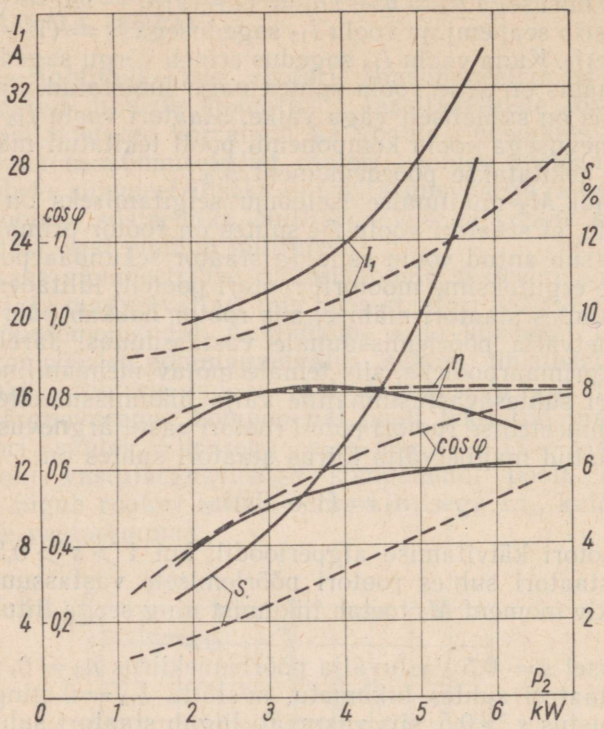
Seega mootori käivitamise algperioodil, kui $1 > s > 0{,}5$, pöörleb see väli staatori suhtes rootori pöörlemisele vastassuunas. Sel puhul tekkiv moment M_2 toetab liikumist ning seega liitub momendiga M_1.

Libistusel $s = 0{,}5$ vastuvälja pöörlemiskiirus $n_3 = 0$, seega see väli on staatori suhtes liikumatu, mistõttu $I_{13} = 0$ ning $M_2 = 0$.

Kui libistus $s > 0{,}5$, siis vastuväli liigub staatori suhtes samas suunas mis rootorgi. Seega selle välja poolt tekitatud moment M_2 on nüüd negatiivne, pidurdab rootori liikumist ning vähendab momenti M_1.

Joonisel 30-3 on toodud momentide M_1 ja M_2 ning nende poolt tekitatud resulteeriva momendi M kulg olenevalt libistusest. Nagu siit nähtub, tekib resulteeriva momendi kõveras umbes poolel sünkroonkiirusel järsk momendi langus. Kui rootori takistuste ebasümmeetria on küllalt suur, siis $M = M_1 + M_2$ muutub piirkonnas $s > 0{,}5$ negatiivseks. Selline olukord esineb ühe rootori faasiahela katkemise puhul. Kui niisugune ebasümmeetrilise rootoriahelaga asünkroonmootor käivitada takistusmomendiga, mis ületab kiirusel $\sim 0{,}5n_1$ minimaalse momendi M_{min} väärtuse, siis võib mootor jääda töötama püsivalt umbes poolel sünkroonkiirusel.

Staatori vool I_{13} sagedusega f_3, sulgudes elektrivõrgu kaudu, liitub vooluga I_1. Väikese libistuse korral sagedused f_3 ja f_1 erinevad teineteisest väga vähe (näit. $f_1 = 50$ Hz ja $s = 0{,}01$ korral $f_3 = (1 - 2 \cdot 0{,}01)50 = 49$ Hz). Üksteisest vähe erinevate sagedustega voolude liitmise korral tekib voolu tuikamine sagedusega $f_1 - f_3$, mis avaldub staatori vooluahelasse lülitatud ampermeetri osuti võnkumises tuikamissagedusega $f_1 - f_3$. Viimane nähtus on seega vigase rootori tunnuseks.



Joon. 30-4. Faasirootoriga asünkroonmootori AK 61-6 põhilised töökarakteristikud rootori ühe faasi ebasümmeetria korral (pidev joon) ning normaalse rootori korral (punktiirjoon)

Staatori voolu tuikamine tekib juba rootori võrdlemisi väikese ebasümmeetria korral, mis võib olla tingitud näiteks ebaühtlasest harjade survest kontaktrõngastele. Selline tuikamine esineb ka vigastuste puhul lühisrootori mähises.

Rootori ebasümmeetria korral halvenevad peale momendikõvera moonutuse veel töökarakteristikud. Vastujärgnevusega rootorivoolu poolt tekitatud magnetvälja mõjul suurenevad staatori vool ja kaod mootoris; vähenevad kasutegur ja võimsustegur. Joon. 30-4 on näitena toodud faasirootoriga asünkroonmootori AK61-6 põhilised töökarakteristikud ebasümmeetrilise rootori korral, kui rootori ebasümmeetria on esile kutsutud rootori ühe faasi aktiivtakistuse suurendamise teel umbes kümme korda. Samas on toodud ka võrdluseks töökarakteristikud normaalse rootori korral. Toodud karakteristikutest nähtub, et koormuse suurenemisel suureneb kiiresti libistus ja seega ka rootori vool. Seetõttu ebasümmeetrilise rootoriga asünkroonmootori koormamine kuni staatori nimivooluni pole enam või-

malik. Näiteks kui staatori voolu järgi oleks mootorit võimalik koormata kuni 5,1 kW, s. o. $\frac{5,1}{7} \cdot 100 = 73\%$ nimikoormusest, siis lähtudes nimilibistusest (seega ka umbes rootori nimivoolust) oleks piirkoormuseks 3,8 kW, s. o. $\frac{3,8}{7} \cdot 100 = 54\%$ nimikoormusest.

XXXI PEATÜKK

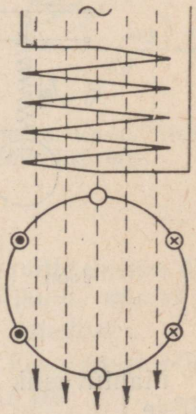
ERITÜÜPI ASÜNKROONMOOTORID

31-1. KÄIVITUSMÄHISTEGA ÜHEFAASILISED ASÜNKROONMOOTORID

Ühefaasilised asünkroonmootorid leiavad laialdast kasutamist väikese võimsusega elektriseadmetes (majapidamistööriistad, käsitööriistad, elektrigrammofoni mootorid jne.). Nende võimsus on tavaliselt kuni 0,6 kW.

Ühefaasiliste asünkroonmootorite staatoril asub ühefaasiline töömähis, mis tavaliselt hõlmab $^2/_3$ poolusejaotusest. Niisuguse mähise saame hariliku kolmefaasilise tähte ühendatud mähise kahe faasi kasutamisel. Rootorina kasutatakse enamasti kolmefaasilise asünkroonmootoriga sarnast lühismähisega rootorit.

Ühefaasilise staatorimähise toitmisel ühefaasilise vahelduvvooluga tekitab viimane pulseeriva mmj. Seisva rootori korral tekib masinas vahelduv (pulseeriv) magnetväli, mis indutseerib rootori mähises analoogiliselt transformaatorile emj. ning kutsub esile voolu. Joonisel 31-1 on skemaatiliselt kujutatud ühefaasiline lühisrootoriga asünkroonmootor. Kui antud hetkel staatori poolt tekitatud magnetvoog suureneb nooltega näidatud suunas, siis Lenzi seaduse järgi see muutuv magnetvoog kutsub esile rootori lühismähises voolud, mille suunad on joonisel tähistatud (ristiga — vool on suunatud joonise pinnalt tahapoole, punktiga — vool on suunatud vaataja suunas). Nende voolude ja magnetvoo koosmõjul tekitatakse vasaku käe reegli põhjal elektromagnetilised jõud, mis rootori vasakpoolses ja parempoolses osas on võrdsed, kuid mõjuvad üksteisele vastu. Seega nende elektromagnetiliste jõudude poolt tekitatud moment seisva rootori korral on võrdne nulliga ja rootor ei saa hakata pöörlema.



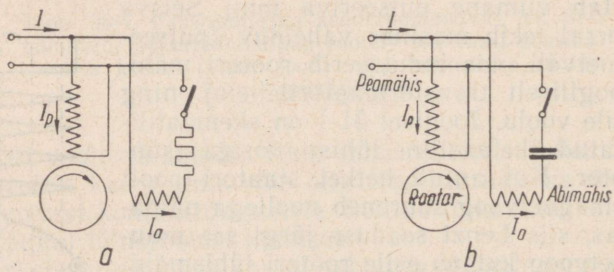
Joon. 31-1. Voolude jaotus ühefaasilise asünkroonmootori seisva rootori lühismähises

Ühefaasilise asünkroonmootori võime saada harilikust kolmefaasilisest asünkroonmootorist ühe faasijuhtme kõrvaldamisel. Sellist kolmefaasilise asünkroonmootori ühefaasilist tööreżiimi vaatlesime lähemalt p. 30-4 ja siinkohal me seda enam ei käsitle. Märgime vaid, et ühefaasilise asünkroonmootori võimsustegur ($\cos \varphi$) ja kasutegur on madalamad kui sama võimsusega kolmefaasilise asünkroonmootori vastavad näitajad.

Ühefaasiliste asünkroonmootorite käivitamine toimub tavaliselt staatoril asuva lisamähise (käivitusmähise) abil, mis on paigutatud staatorile nii, et tema poolt tekitatud mmj. oleks nihutatud ruumiliselt 90° (elektrilist) peamähise mmj. suhtes. Kui niisugust lisamähist toita vooluga, mis omab peamähist läbiva voolu suhtes faasinihke 90°, siis mõlema mähise koostegevus kutsub esile pöördmagnetvälja. Pärast normaalkiiruse saavutamist lülitatakse lisamähis välja.

Kuna töömähis haarab enda alla kolmandiku kogu staatori ringist, siis käivitusmähise paigutamiseks jääb järele üks kolmandik. Sellise mähiste süsteemi võime saada tähte ühendatud kolmefaasilisest staatorimähisest, kui ühe faasi otsa eraldame nullpunktist ja kasutame seda faasi käivitusmähisena. Kaks ülejäänud faasi moodustavad siis töömähise. Viimase nimipingeks jääb kolmefaasilise lähtemähise liinipinge. Käivitusmähise keerdude arv üldjuhul võib erineda lähtemähise ühe faasi keerdude arvust.

Lisamähist läbiva voolu faasinihke saavutamiseks lülitatakse tema vooluahelasse kas aktiiv- (joon. 31-2, *a*) või mahtuvuslik takistus (joon. 31-2, *b*).



Joon. 31-2. Ühefaasiliste asünkroonmootorite käivitusskeeme

Mahtuvuslik takistus annab faasinihke, mis on üsna lähedane 90°-le.

Käivitusmähis koos kondensaatoriga lülitatakse käivituse lõpul välja. Automaatseks väljalülitamiseks kasutatakse kas tsentrifugaallülitit või aegreleed. Kondensaatorkäivitust kasutatakse juhtudel, kus on nõutav suhteliselt suur käivitusmoment.

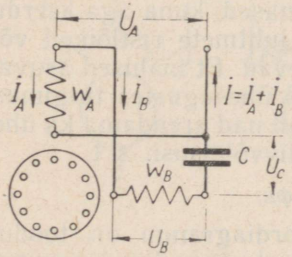
Kui vajalik käivitusmoment ei ole suur, näiteks ventilaatorite

käivitamise puhul, siis kasutatakse odavamat käivitusviisi — aktiivtakistusega lisamähises. Seejuures võib aktiivtakistus olla kujundatud mitmeti: 1) väline lisatakistus, 2) lisamähise valmistamine suurema eritakistusega või väiksema ristlõikega traadist või mähkimisega bifilaarselt.

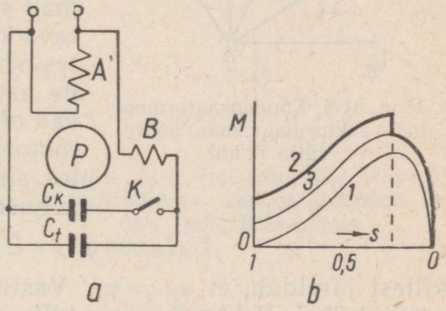
Vaadeldav ühefaasiline mootor võib arendada võimsust, mis moodustab ca 50% kolmefaasilise lähtemootori võimsusest.

31-2. ÜHEFAASILISED KONDENSAATORMOOTORID

Suuremate võimsuste puhul või paremate karakteristikute saavutamiseks on otstarbekohane eelmises punktis kirjeldatud mootorid ümber kujundada selliselt, et käivitus- või antud juhul õigemini lisamähis jääks tegevusse ka töörežiimis, kujunedes seega samuti töömähiseks (joon. 31-3). Seejuures saame tegelikult kahefaasilise staatorimähise, kusjuures üht faasi toidetakse kondensaatori kaudu 90° nihkenurga saamiseks. Käivitusmähise muutmisega töömähiseks on võimalik mootori võimsust suurendada 50 . . . 60% võrra.



Joon. 31-3. Ühefaasilise kondensaatormootori põhimõtteskeem



Joon. 31-4. Ühefaasiline kondensaatormootor ja tema momendikõverad

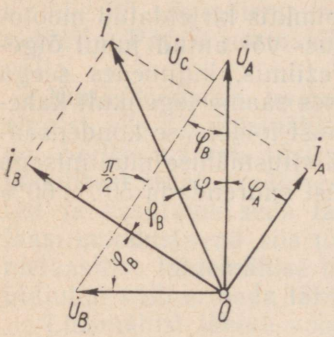
Tänu kondensaatorile omab niisugune mootor mitte üksnes häid käivituskarakteristikuid, vaid ka töökarakteristikuid, mis ei jää palju maha kolmefaasiliste asünkroonmootorite omadest.

Ühefaasilised kondensaatormootorid leiavad kasutamist põllumajanduse elektriseadmeis, majapidamisseadmeis jm.

Tavaliselt on kondensaatormootorites käivitamiseks vajalik kondensaatori mahtuvus suurem kui töötamiseks vajalik mahtuvus. Seetõttu kasutatakse lülitusskeeme (joon. 31-4, *a*), kus C_t on töökondensaator ja C_k — käivituskondensaator, mis lülitatakse välja pärast vajaliku kiiruse (harilikult 80% nimikiirusest) saavu-

tamist. Joonisel 31-4, *b* on toodud niisuguse kondensaatormootori momendi võrdlevad kõverad. Masina käivitamisel, kui on sisse lülitatud mõlemad kondensaatorid (C_t ja C_k), toimub mootori momendi kulg kõvera *2* järgi. Pärast kondensaatori C_k väljalülitamist võtab momendikarakteristik kõveraga *3* näidatud kuju. Võrdluseks on toodud siin ühefaasilise asünkroonmootori momendikõver *1*. Nagu siit näha, võimaldab kondensaatori juurdelülitamine tublisti tõsta käivitusmomendi väärtust.

Pöörleva magnetvälja saavutamiseks on vaja, et need kaks ruumiliselt 90° (elektrilise) võrra nihutatud mähist, mida toidetakse faasis 90° võrra nihutatud vooludega, tekitaks sümmeetrilise kahefaasilise süsteemi. Ühesuguste mähiste korral ($w_A = w_B$ ja $k_{wA} = k_{wB}$) oleks vaja mähistele rakendada sümmeetriline kahefaasiline pinge $\dot{U}_A = j\dot{U}_B$, mis tekitaks sümmeetrilise voolude süsteemi $\dot{I}_A = j\dot{I}_B$. Sel korral mähiste näivvõimsused oleksid võrdsed: $U_A I_A = I_B I_B$. Vastavalt antud juhule peavad mõlemad mähised või faasid nii kasutatava ruumi kui juhtmete kaalu suhtes olema samased, kuna aga keerdude arvud ja juhtmete ristlõiked võivad olla erinevad. Et mähised asuvad rootori suhtes ühesugustes tingimustes, siis peavad nad arendama ka ühesuguseid aktiivvõimsusi, s. t.



Joon. 31-5. Kondensaatormootori vektordiagramm pöördvälja puhul

$$U_A I_A \cos \varphi_A = U_B I_B \cos \varphi_B,$$

millest järeldub, et $\varphi_A = \varphi_B$. Vastav vektordiagramm on toodud joonisel 31-5. Vektordiagrammilt on näha, et pinge kondensaatori klemmidel $U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}$. Teiselt poolt $U_C = U_B \sin \varphi_B$. Seega pöördvälja tekitamiseks vajaliku mahtuvuse suuruse leiame seosest

$$I_B = \frac{U_C}{x_c} = \frac{U_B}{\sin \varphi_B} \omega C_t,$$

millest

$$C_t = \frac{I_B \sin \varphi_B}{\omega U_B}. \qquad (31\text{-}1)$$

Kondensaatori C_B näivvõimsus

$$P_C = U_C I_B = \frac{U_B I_B}{\sin \varphi_B}. \qquad (31\text{-}2)$$

Mootori poolt võrgust võetav näivvõimsus

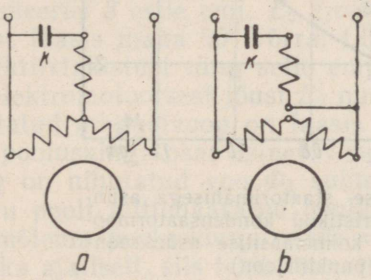
$$P = U_A I = U_C I \cos \varphi_B = \frac{U_B I_B}{\sin \varphi_B}. \qquad (31\text{-}3)$$

Seega avaldiste (31-2) ja (31-3) järgi peab kondensaator olema arvestatud mootori kogu näivvõimsusele.

Siinkohal on vaja märkida, et kondensaatori mahtuvusel C_t saavutatakse pöördväli ainult voolu I kindlal väärtusel. Koormuse muutumisel halvenevad kondensaatormootori töötingimused. Nende parandamiseks võib kondensaatori C_t teha muudetava mahtuvusega, mis muudab aga mootori tööskeemi keeruliseks.

Eespool toodud lülitust (joon. 31-3) kasutatakse peamiselt väikese võimsusega nn. mikromasinates, mida rakendatakse automaatikalülitustes ja eriseadmetes.

Keskmise võimsusega kondensaatormootorite korral kasutatakse peamiselt kolmefaasilise staatorimähisega asünkroonmootoreid, kusjuures üksikute faaside mähised valmistatakse tavaliselt ühesugustena. Niisuguse kondensaatormootori staatori mähise ratsionaalsemad ühendusskeemid on toodud joonisel 31-6.



Joon. 31-6. Kolmefaasilise staatorimähisega kondensaatormootori põhimõtteskeeme

Selleks et niisuguse kondensaatormootori käivitusmoment ei oleks väiksem kui normaalsel kolmefaasilise lühisrootoriga asünkroonmootoril, on vaja mootori käivitamise perioodiks sisse lülitada käivitusmahtuvus, mille suuruse võib ligikaudu arvutada valemiga

$$C_k = \frac{10^6}{2\pi f_1 (2 \ldots 3) x_k} \ \mu\text{F}, \qquad (31\text{-}4)$$

kus x_k — asünkroonmootori lühise induktiivtakistus normaalsel kolmefaasilisel toitel.

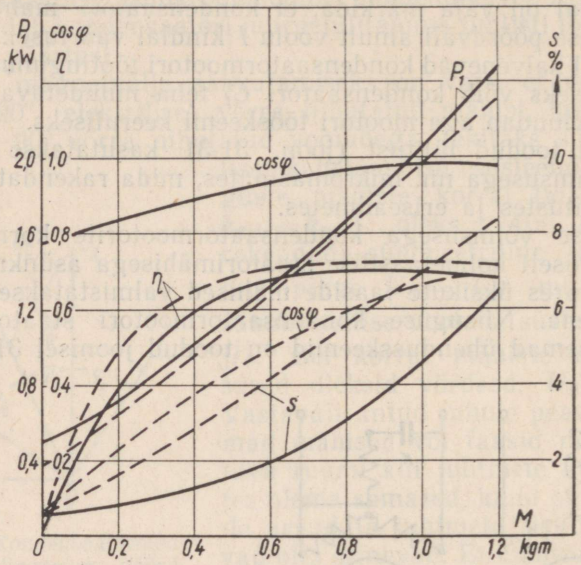
Töömahtuvus on soovitav valida nii, et vool mähistes nimitöörežiimil ei ületaks lubatavaid väärtusi. Selle tingimuse täitmiseks peab kondensaator omama mahtuvust

$$C_t = \frac{10^6}{2\pi f_1 x_C} \ \mu\text{F}, \qquad (31\text{-}5)$$

kus

$$x_C = 1{,}75 \frac{U}{\sqrt{3}\, I_n}$$

kondensaatori mahtuvustakistus.

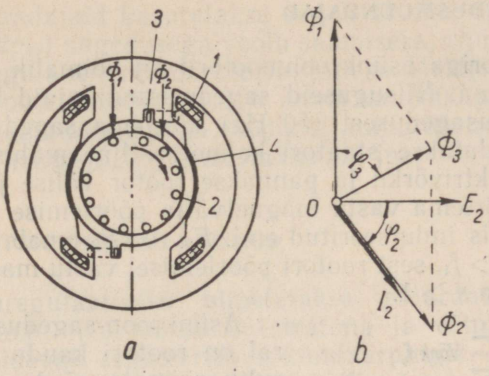


Joon. 31-7. Kolmefaasilise staatorimähisega asünkroonmootori töökarakteristikud kondensaatormootorina (pidev joon) ja kolmefaasilise asünkroonmootorina (punktiirjoon)

Joonisel 31-7 on näitena toodud kolmefaasilise staatorimähisega asünkroonmootori töökarakteristikud kondensaatormootorina (pideva joonega) ja kolmefaasilise asünkroonmootorina (punktiirjoonega). Graafikult selgub, et kondensaatormootori võimsustegur on nimikoormusel väga lähedane ühele, muutudes vähe koormuse muutumisel.

31-3. ÜHEFAASILISED MOOTORID LÜHISKEERDUDEGA POOLUSTEL

Väikese võimsusega 0,5 . . . 30-W ühefaasilistes asünkroonmootorites kasutatakse sageli nähtavate üksikpoolustega staatori mähist (joon. 31-8, *a*), mille pooluskinga ühte poolde on asetatud lühiskeerd (või keerud). Niisuguse mootori töö paremaks selgitamiseks vaatleme lähemalt magnetväljade tekkimist ühe pooluse ja ankru vahelises õhupilus. Staatori mähise *1* (joon. 31-8, *a*) poolt



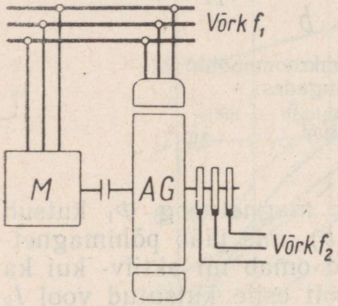
Joon. 31-8. Ühefaasiline asünkroonmootor lühiskeeruga pooluskingades:
1 — staatori mähis; *2* — rootori mähis; *3* — lühiskeerd; *4* — magnetiline šunt

tekitatud ja võrgu sagedusega pulseeriv magnetvoog Φ_1 kutsub lühiskeerus *3* esile emj. E_2 (joon. 31-8, *b*), mis jääb põhimagnetvoost faasis maha 90° võrra. Lühiskeerd omab nii aktiiv- kui ka induktiivtakistust ning selle emj. E_2 poolt esile kutsutud vool I_2 on elektromotoorsest jõust E_2 nurga φ_2 võrra taga. Voolu I_2 poolt tekitatud magnetvoog on faasis vooluga I_2. Lühiskeeruga haaratud pooluskinga osas esinev voog Φ_3 on voogude Φ_1 ja Φ_2 summa ning on nihutatud voo Φ_1 suhtes teatud nurga φ_3 võrra. Lühiskeeru poolt mittehaaratud pooluskinga osas esineb aga voog Φ_1. Et mõlema pooluskinga osade vood on nihutatud nii ruumiliselt kui ka ajaliselt, siis tekib magnetväli, mis sarnaneb pöördväljaga: pooluskinga ulatuses esineb ruumiliselt liikuv magnetväli. Selle magnetvälja ning tema poolt rootoris *2* indutseeritud voolude koosmõjul tekitatakse pöördemoment, mis paneb rootori pöörlema. Rootori pöörlemissuund on joonisel 31-8, *a* näidatud noolega. Mõnel juhul asetatakse pooluskinga otste vahele teraslehekesest magnetiline šunt *4*, mis parandab ühefaasilise asünkroonmootori käivitus- ja töökarakteristikuid.

Lühiskeerdudega mootoreid kasutatakse seadmeis, kus ei nõuta suurt algmomenti, nagu näit. ventilaatori mootorid, grammofoni mootorid jne.

Lühiskeerus esinevad suhteliselt suured energiakaod, mis mõjutab tublisti kasutegurit. Seepärast kasutatakse lühiskeeruga mootoreid tavaliselt ainult võimsusteni kuni 15 W.

Faasirootoriga asünkroonmootorit on võimalik kasutada sagedusmuundajana. Niisuguseid sagedusmuundajaid kasutatakse tavaliselt võrgusagedusest (50 Hz) kõrgema sageduse saamiseks. Selleks ühendatakse staatori kolmefaasiline mähis normaalsagedusega f_1 elektrivõrku ja pannakse rootor välise jõu (teise mootori) abil pöörlema vastu magnetvälja pöörlemise suunda (joon. 31-9). Rootoris indutseeritud emj. $E_{2s} = sE_2$ omab sel puhul sagedust $f_2 = sf_1 > f_1$, sest rootori pöörlemisel vastu magnetvälja pöörlemise suunda $s > 1$.



Joon. 31-9. Asünkroon-sagedusmuundaja skeem

Asünkroon-sagedusmuundaja korral on rootori kaudu edasiantav kasulik võimsus võrdne võrgust võetava pöördvälja elektrilise võimsuse

$$P_e = \Omega_1 M_2$$

ja võlli kaudu ajamilt ülekantava mehaanilise võimsuse

$$P_m = \Omega M_2 = P_{aj}$$

summaga, s. o. $P_2 = P_e + P_m = (\Omega_1 + \Omega) M_2$,

kus Ω_1 — magnetvälja pöörlemise nurkkiirus,

Ω — ajami (ka rootori) nurkkiirus,

M_2 — sagedusmuundaja moment.

Toodud seoseist saame ajami võimsuse jaoks avaldise

$$P_{aj} = P_2 \frac{\Omega}{\Omega_1 + \Omega} = P_2 \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right), \qquad (31\text{-}6)$$

kus $f_1 = \Omega_1 \, (p_{sg}/2\pi)$ — võrgusagedus,

$f_2 = (p_{sg}/2\pi)(\Omega_1 + \Omega)$ — asünkroon-sagedusmuundajast saadav sagedus,

p_{sg} — asünkroon-sagedusmuundaja pooluspaaride arv.

Nagu nähtub toodud avaldisest, moodustab ajami võimsus ainult osa kogu agregaadi võimsusest, mis on seda suurem, mida kõrgem on saadav sagedus.

Ajammootorina kasutatakse tavaliselt asünkroonmootorit. Kui niisuguse mootori pooluspaaride arv on p_{aj}, siis asünkroon-sagedusmuundaja libistus

$$s = \frac{n_1 + n_2}{n_1} \approx \frac{p_{sg} + p_{aj}}{p_{aj}}$$

ja järelikult

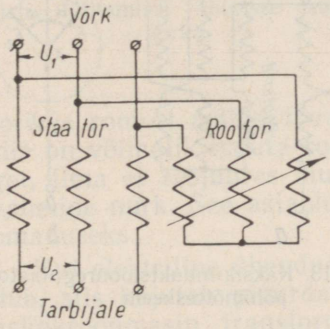
$$f_2 = sf_1 \approx \frac{p_{sg} + p_{aj}}{p_{aj}} f_1.$$

Sagedusmuundajaid kasutatakse sageli 100-Hz ($p_{sg} = p_{aj}$) või 150-Hz ($p_{sg} = 2p_{aj}$) sagedusega voolu saamiseks, mida kasutatakse kõrge sagedusega asünkroonmootorite toiteks elektriajamites, kus nõutakse suuri pöörlemiskiirusi, s. o. enam kui 3000 p/min. Näitena võib nimetada käsi-tööriistu ja tööpinke puidutööstusele, käsi-metallitööriistu, lihvimispinke, ketrusmasinaid jne.

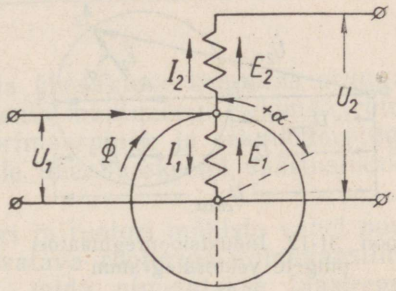
31-5. INDUKTSIOONREGULAATORID

Induktsioonregulaatoriks nimetatakse pidurdatud rootoriga asünkroonmasinat, mis töötab autotrafona ja võimaldab rootori pööramisega pidevalt reguleerida sekundaarpinget.

Rohkem kasutamist leiavad kolmefaasilised induktsioonregulaatorid, mille tööpõhimõtet vaatleme siinkohal lähemalt.



Joon. 31-10. Kolmefaasilise induktsioongeneraatori põhimõtteskeem



Joon. 31-11. Induktsioonregulaatori tööpõhimõtte selgitamiseks

Kolmefaasilise induktsioonregulaatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 31-10. Selleks et vähendada rootori mähisest väljatoodavate juhtmete arvu, kasutatakse viimast tavaliselt primaarmähisena, staatori mähist aga sekundaarmähisena.

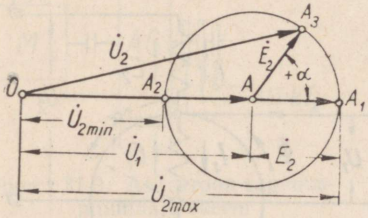
Induktsioonregulaatori töötamispõhimõte on järgmine. Rootori mähise poolt, mis töötab primaarmähisena, tekitatakse pöörlev magnetväli. See pöörlev magnetväli indutseerib primaar- ja sekundaarmähises emj. $E_1 \approx U_1$ ja E_2, millede suurus ei olene rootori asendist. Rootori asendi muutumisega muutub induktsioonregulaatori sekundaarpinge U_2, mis on pingete U_1 ja E_2 geomeetriline summa.

Vaatleme olukorda kolmefaasilise induktsioonregulaatori ühes faasis juhul, kui rootori ja staatori mähise teljed ühtivad (joon. 31-11). Sel korral rootori poolt tekitatud magnetvoog läbib samaaegselt rootori ja staatori mähiseid, mistõttu tema poolt indutsee-

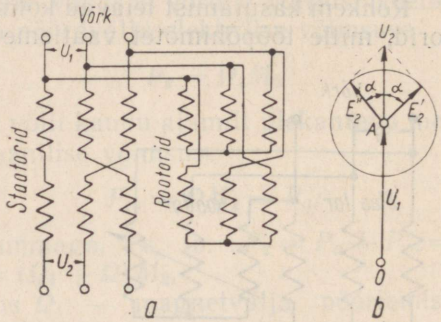
ritud emj. E_1 ja E_2 ühtivad suunalt ja faasilt. Seepärast sekundaarpinge U_2 kujutab primaarpinge U_1 ja E_2 aritmeetilist summat ja omab maksimaalset väärtust, s. o. $U_2 = U_1 + E_2 = OA_1 = U_{2\,max}$ (joon. 31-12).

Rootori pööramisel nurga $\alpha = \pm 180°$ võrra on emj. E_2 suunalt elektromotoorsele jõule E_1 (U_1) vastupidine ja sekundaarpinge omab minimaalset väärtust $U_2 = U_1 - E_2 = OA_2 = U_{2\,min}$.

Rootori pööramisel magnetvälja pöörlemise suunas nurga α võrra (joon. 31-11) läbib pöördväli enne sekundaarmähist (staatori mähist) ja siis primaarmähist (rootori mähist). Seetõttu vektor $E_2 = AA_1$ (joon. 31-12), jäädes muutumatuks oma suuruselt,



Joon. 31-12. Induktsioonregulaatori pingete vektordiagramm



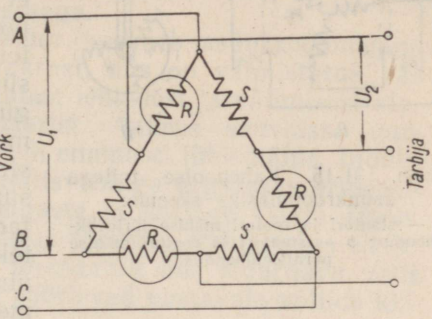
Joon. 31-13. Kaksik-induktsioonregulaatori põhimõtteskeem

liigub vektorite liikumise suunas (vastu kellaosuti liikumise suunda) nurga α võrra (vektor AA_3). Vektorite U_1 ja E_2 geomeetriline summa, mis annab sekundaarpinge U_2, muutub seega oma suuruselt väärtuste $U_{2\,min}$ ja $U_{2\,max}$ vahel, olenevalt rootori pöördenurgast α. Seejuures muutub ka primaar- ja sekundaarpinge vaheline nihkenurk.

Viimane asjaolu on puuduseks, kui on nõutav, et sekundaarpinge faas primaarpinge suhtes ei muutuks. Niisugusest puudusest on vaba kaksik-induktsioonregulaator, mille põhimõtteskeem on näidatud joonisel 31-13. Rootorid asuvad ühisel võllil ja nende mähised on lülitatud paralleelselt elektrivõrku. Staatori mähised on lülitatud järjestikku. Nii rootori kui ka staatori faasijuhtme ümberlülitamisega ühes neist induktsioonregulaatoreist saavutatakse magnetväljade vastupidine pöörlemissuund. Seetõttu kummagi regulaatori pöördemomendid tasakaalustavad teineteist ja resulteeriv moment regulaatori võllil on võrdne nulliga. Rootori pööramisel mingi nurga α võrra kummagi regulaatori elektromotoorsed jõud E_2' ja E_2'' pöörduvad sama nurga võrra,

kuid eri suunas, mistõttu resulteeriv sekundaarpinge (kui jätta kõrvale pingelang induktsioonregulaatoris) ei muuda oma asendit primaarpinge suhtes (joon. 31-13, *b*).

Paljudel juhtudel omavad eeliseid induktsioonregulaatorid, mille staatori *S* ja rootori *R* mähised on ühendatud ühise kolmnurgana (joon. 31-14). Kui niisuguse induktsioonregulaatori staatori ja rootori mähised valmistada ühesuguste keerdude arvuga, siis on võimalik muuta rootori asendi muutmisega sekundaarpinget, ilma et seejuures muutuks primaarpinge ja sekundaarpinge vaheline nurk. See asjaolu on selle ühendusskeemi väärtuslikuks omaduseks.



Joon. 31-14. Induktsioonregulaatori skeem staatori ja rootori mähiste lülitamisel ühisesse kolmnurka

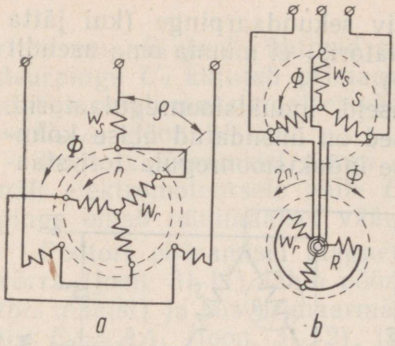
Kui elektriline ühendus staatori ja rootori mähiste vahel puudub, siis kujutab pidurdatud pööratava rootoriga kolmefaasiline asünkroonmasin transformaatorit, mida nimetatakse faasiregulaatoriks. Ühe mähise (kas staatori või rootori) lülitamisel võrku muudab teise mähise (rootori või staatori) pinge rootori pööramisel oma faasi esimese mähise pinge suhtes, jäädes oma suuruselt muutumatuks.

31-6. KAHEPOOLSE TOITEGA MASINAD

Kahepoolse toitega masinad kujutavad faasirootoriga asünkroonmasinat, mille kas järjestikku või paralleelselt ühendatud staatorimähiseid w_s ja rootorimähiseid w_r toidetakse ühisest elektrivõrgust (joon. 31-15).

Staatori ja rootori mmj. koostegevusel tekitatakse elektromagnetiline moment ainult sel juhul, kui viimased liiguvad sünkroonselt, s. t. on üksteise suhtes liikumatud.

Kui toidame staatori ja rootori mähiseid nii, et nende poolt tekitatud magnetväljad liiguvad samas suunas, siis nende magnetväljade sünkroonne pöörlemine toimub ainult rootori paigalseisul. Niisugusel korral asünkroonmasin kujutab reguleeritavat



Joon. 31-15. Kahepoolse toitega asünkroonmasina skeeme:
a — staatori ja rootori mähise järjestikühendus; *b* — staatori ja rootori mähise paralleelühendus

induktiivtakistust, mille suurust on võimalik muuta rootori asendi muutmisega.

Kahepoolse toitega masinate korral toidetakse staatori ja rootori mähiseid nii (joon. 31-15), et nad tekitavad vastassuunas pöörlevad magnetväljad, mis üksteise suhtes liiguvad kahekordse sünkroonkiirusega $2n_1$. Kui niisuguse masina rootor panna pöörlema kahekordse sünkroonkiirusega staatori magnetvälja pöörlemise suunas, siis mõlemad magnetväljad liiguvad ruumis sünkroonselt, tekitades resulteeriva magnetvälja ning arendades kindlat pöördemomenti, mille suurus ja märk olenevad magnetväljade (või voolude) tugevusest ning nende asendist üksteise suhtes. Seega omab niisugune masin kahekordse rootori kiiruse puhul sünkroonmasina omadusi ja võib töötada nii mootorikui ka generaatorirežiimis. Vajaliku kiiruse saavutamiseks tuleb teda aga käivitada abimootoriga.

Kuna magnetvälja tekitavad poolide süsteemid püüavad võtta asendit, kus magnetvälja energia oleks maksimaalne, siis kahepoolse toitega masinas tekkiv sünkroonmoment püüab kohastada staatori ja rootori magnetvälja telgi. Masina koormamisel rootori magnetvoo telg on resulteeriva magnetvoo teljest järel teatud nurga võrra (analoogiliselt sünkroonmasinale), mistõttu staatori ja rootori mmj. teljed enam ei ühti, vaid moodustavad nurga ϱ (joon. 31-15, *a*).

Teoreetiliselt omab kahepoolse toitega mootor väga häid ekspluatatsiooninäitajaid (võimsustegur, kasutegur ja ülekoormatavus), kuid praktiliselt ei saa neid täiesti ära kasutada, sest mootor omab kalduvust võnkumisele, mille tulemusel ta võib sünkronismist välja langeda. Mootori töö stabiliseerimiseks tuleb rootoriahelasse lülitada lisatakistusi ja teha mootor magnetiliselt väga küllastatuks, mistõttu aga vähenevad mootori kasutegur, võimsustegur ja ülekoormatavus. Kahepoolse toitega mootori puuduseks on veel see, et tema käivitamiseks on vaja abimootorit.

Ülaltähendatud puuduste tõttu pole kahepoolse toitega mootorid leidnud laialdast kasutamist.

31-7. ELEKTROMAGNETILISED LIBISTUSSIDURID

Elektromagnetilisi sidureid kasutatakse kahe pöörleva võlli elastseks sidestamiseks. Oma töötamispõhimõtte poolest jagunevad nad: 1) hõõrdsiduriteks ja 2) libistus- ehk asünkroonsiduriteks. Siinkohal vaatleme ainult viimast tüüpi sidureid, sest nad omavad palju ühist asünkroonmasinaga.

Elektromagnetiline asünkroonsidur koosneb asünkroonmasina rootoriga sarnasest seesmisest ankrust, mis on valmistatud kas massiivrauast või koostatud üksikutest lehtedest ja välimisest alalisvoolumasinaga sarnasest induktorist. Ankrus asuvaisse uurdeisse on asetatud kas faasimähis või enamasti lühismähis. Induktoril asub nähtavate poolustega alalisvooluga ergutatav ergutusmähis, mida toidetakse kontaktrõngaste ja harjade kaudu (joon. 31-16). Kasutatakse ka välise ankru ja seesmise induktoriga elektromagnetilisi sidureid. Ankur on ühendatud ühe sidurdava võlli otsaga, induktor teisega ning nad pöörlevad vastavate võllide kiirustega.

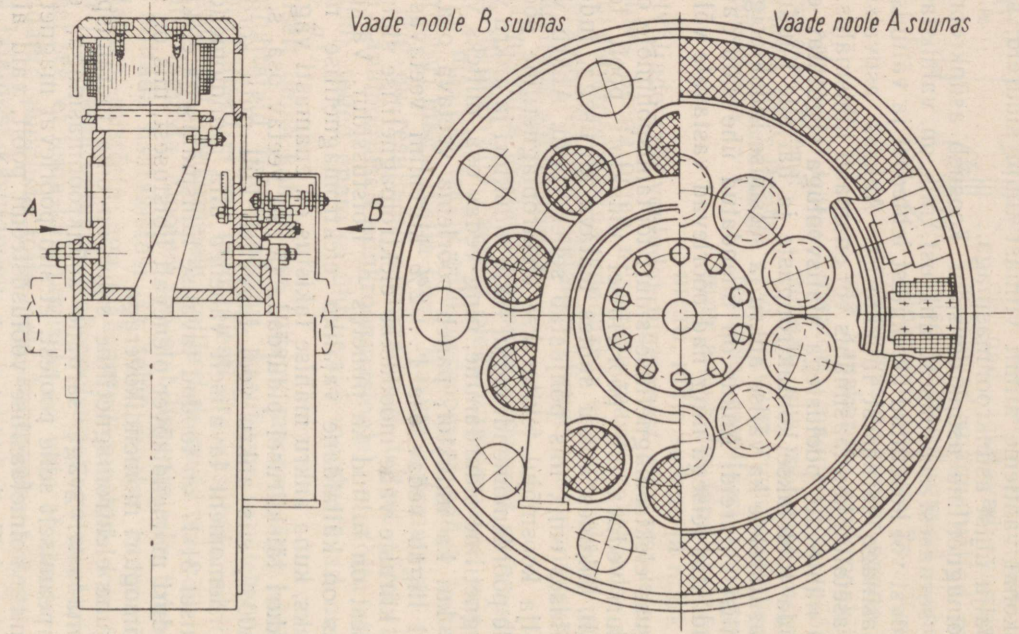
Niisuguse elektromagnetilise siduri töötamispõhimõte on järgmine. Siduri vedava lüli pöörlemisel induktori poolt tekitatud magnetväli, liikudes ankru suhtes teatava kiirusega, indutseerib ankru mähises emj., mis põhjustab selles voolu. Ankru voolu ja magnetvälja koosmõjul tekitatakse elektromagnetiline pöördemoment. Selle pöördemomendi mõjul tekib induktori ja ankru vaheline elektromagnetiline sidurdamine, ning vedav osa, milleks võib olla nii ankur kui ka induktor, paneb pöörlema veetava osa. Siduri töötamisel liigub vedav osa 1 ... 2% kiiremini veetavast osast. See väike kiiruste vahe moodustab elektromagnetilise siduri libistuse, millest on tulnud ka nimetus — libistussidur. Väike suhteline kiirus on küllaldane vajaliku elektromagnetilise momendi tekitamiseks, kuna ankru mähise takistus on enamasti väga väike.

Kui siduri täiskiirusel pidurdada täiesti veetav osa, s. t. libistus $s = 100\%$, siis ankru vool tugevneb küll mitu korda, kuid siduri pöördemoment tavaliselt väheneb alla nimimomendi väärtuse. Joonisel 31-17 on toodud tavalise lühismähisega elektromagnetilise siduri momendikõver olenevalt libistusest, mis on sarnane asünkroonmootori momendikõveraga.

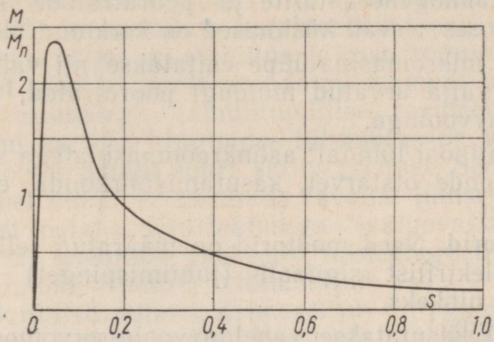
Niisugune elektromagnetiline sidur on oma töötamispõhimõttelt ja omadustelt väga sarnane asünkroonmasinaga, erinedes viimasest peamiselt selle poolest, et siin pöörlevat magnetvälja ei tekitata mitte kolmefaasilise voolusüsteemi poolt, vaid alalisvooluga ergutatud üksikpoolustega induktori mehaanilisel pöörlemisel ankru suhtes. Seepärast nimetatakse seda elektromagnetilist sidurit sageli ka asünkroonseks.

Kirjeldatud elektromagnetiline sidur leiab kasutamist laevakruvi ajamites ja samuti ka aerodünaamilistes seadmetes.

Elektromagnetilise siduri sidurdamine toimub lihtsalt ja suju-



Joon. 31-16. Elektromagnetiline asünkroonsidur sisemise ankruga



Joon. 31-17. Lihtsa lühismähisega elektromagnetilise siduri momendi sõltuvus libistusest

valt alalisvoolu tugevuse reguleerimisega. Olenevalt ergutusvoolu tugevusest muutub ka vääratusmomendi suurus. Seega kindla vääratusmomendi etteandmisega on võimalik lihtsalt kaitsta veomootorit võimalike ülekoormuste eest. Kui valmistada ankru mähis kaksik-lühismähisena, on võimalik saavutada väga suuri käivitusmomente.

Kui ankur on varustatud faasimähisega ning tema ahelasse on lülitatud kolmefaasiline reostaat, siis on vedava osa konstantse kiiruse juures võimalik reguleerida veetava osa kiirust laiades piirides kas reostaadi takistuse või ergutusvoolu muutmise abil.

31-8. AUTOMAATIKAS KASUTATAVAD ASÜNKROON-MIKROMASINAD

Masinate tüübid. Mikromasinateks nimetatakse alalisvoolu- või vahelduvvoolumasinaid võimsusega mõnest vatist kuni mõnesaja vatini. Neid kasutatakse peamiselt automaatse juhtimise skeemides, telemehaanikas, arvutusmasinates jne. Oma otstarbe järgi jagunevad mikromasinad nelja põhirühma:

1) servomootorid,
2) tahhogeneraatorid,
3) pöördtrafod,
4) masinad sünkroonseks sidestamiseks.

Automaatseadmete arenemise algetapil kasutati sünkroonse sidestusega masinaid. Hiljem hakkasid arenema süsteemid, kus kasutatakse erinevaid elektromehaanilisi muundajaid, mis töötavad muutuval sagedusel. Tänapäeval kasutatakse peaaegu eranditult püsiva sagedusega induktsioon-mikromasinaid, nn. selsüüne. Ser-

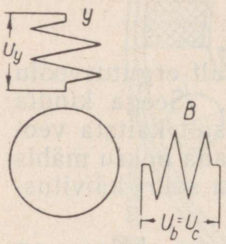
vomootorite, tahhogeneraatorite ja pöördtrafode kasutamise ja uurimisega seoses olevad küsimused on kerkinud üles hiljem.

Nimetatud mikromasinatüüpe ehitatakse nii vahelduv- kui ka alalisvoolule, välja arvatud muidugi pöördtrafod, mis töötavad ainult vahelduvvooluga.

Vaatleme allpool lühidalt asünkroonmasinatega sarnaseid mikromasinaid, nende otstarvet, kasutamispiirkonda, ehitus- ja töötamispõhimõtet.

Servomootorid. Need mootorid on määratud selleks, et muuta neile antud elektrilist signaali (juhtimispinget) mootori võlli mehaaniliseks nihkeks.

Tänapäeval kasutatakse vahelduvvoolu-servomootoritena peamiselt lühisrootoriga asünkroonmootoreid. Nende staatoril asub kaks eraldi mähist: juhtimismähis Y ja ergutusmähis B, mis on teineteise suhtes ruumis nihutatud 90 elektrilist kraadi (joon. 31-18). Ergutusmähis B on püsivalt ühendatud toitepinge U_b allikaga. Joonisel 31-18 toodud skeemi kohaselt võib asünkroonmootori juhtimine toimuda amplituudi või faasi järgi, olenevalt sellest, kas muutub juhtimispinge U_y suurus või tema faas ergutuspinge U_b suhtes. Esimesel juhul rakendatakse juhtimismähisele Y sama sagedusega, kuid ajas 90° võrra nihutatud pinge U_y ainult siis, kui on vaja rootor pöörlema panna, s. t. kui on vaja edasi anda mingit signaali või käsklust elektrilisel teel. Seega kuni signaalpinge andmiseni peab asünkroonmootori rootor seisma paigal.

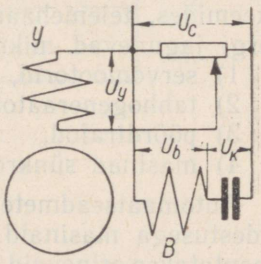


Joon. 31-18. Servomootori põhimõtteskeem

Pingete U_y ja U_b vaheline ajaline nihe saadakse kas vahetult asünkroonmootori toiteskeemi abil või siis ühe antud mähise (tavaliselt ergutusmähise) ahelasse faasinihet tekitava elemendi (kondensaatori) lülitamise teel (joon. 31-19).

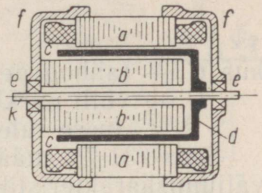
Niisuguse asünkroonmootori pöörlemise suund oleneb sellest, missugune pingetest (U_y ja U_b) on faasis ees. Pöördemoment ja kiirus olenevad pinge U_y suurusest.

Kui juhtimine toimub juhtimispinge U_y faasi muutmise teel, siis on pöördemoment null, kui mõlemad pinged on faasis. Pöörlemissuund oleneb sel juhul sellest, mis suunas pööratakse pinge U_y vektorit. Harilikult on vaadeldaval juhul $U_y = U_b$ ning maksimaalne moment esineb faasinihke puhul 90°.



Joon. 31-19. Kondensaator-servomootori ühendusskeem

Servomootoritele esitatavateks tingimusteks on: 1) iseliikumise puudumine ja 2) mehaaniline karakteristik peab olema sellise kujuga, et oleks võimalik stabiilne kiiruse reguleerimine alates nullist ning et mootori poolt arendatav moment oleks võrdeline juhtimispinge suurusega (amplituudilise reguleerimise puhul). Nii esimese kui ka teise tingimuse täitmiseks on vaja, et asünkroonmootori rootor omaks suurt aktiivtakistust. Seda on võimalik saavutada kahel viisil: 1) kasutada tavalist lühisrootorit suurendatud takistust omava lühismähisega (valgevask- või pronkslühisvardad), 2) kasutada õhukesest mittemagnetilisest materjalist (näiteks alumiiniumist) valmistatud õõnessilindri-kujulist rootorit. Esimesel juhul ei erine asünkroonmootori konstruktiivne kujundus millegi poolest tavalise asünkroonmasina konstruktsioonist. Õõnesrootoriga asünkroonmootori konstruktsiooni põhimõte on toodud joonisel 31-20. Staator *a*, mida nimetatakse välimiseks, on koostatud elektrotehnilistest teraslehtedest ja on varustatud kahefaasilise mähisega *c*. Välimise staatori keskel asub samuti elektrotehnilisest terasest valmistatud seesmine staator *b*, millel pole mähist ja mille ülesandeks on magnetringi magnetilise takistuse vähendamine. Sisemise staatori keskel on ava, mida läbib õõnesrootori *d* võll *k*, mis võib vabalt pöörelda laagritel *e*. Õõnesrootori väikese paksuse tõttu (mõni kümnendik millimeetrit) on tema inertsmoment väike ning servomootori mehaaniline ajakonstant T_m väga väike. Vahelduvvoolu-servomootori mehaaniliseks ajakonstandiks T_m nimetatakse aega, mille jooksul nn. ideaalse servomootori rootor saavutab poole sünkroonkiirusest, kui tema rootorile mõjub tegeliku servomootoriga ühesugune käivitusmoment. «Ideaalseks» nimetatakse servomootorit, mille staatori poolt tarbitud võimsus antakse täielikult üle rootorile.



Joon. 31-20. Õõnesrootoriga asünkroonmootori konstruktsiooni skeem

Servomootorite mehaanilise ajakonstandi T_m keskmised väärtused sekundites mootoritel võimsusega 15 ... 20 W on järgmised.

Tabel 31-1

Mootor	T_m väärtus sek. sagedusel Hz	
	50	400 ... 500
Mittemagnetilise õõnesrootoriga	0,01 ... 0,1	0,02 ... 0,15
Tavalise lühismähisega rootoriga	0,2 ... 1,0	0,3 ... 1,5
Magnetilise õõnesrootoriga	1 .. 2	1,5 ... 3

Tänu väikesele mehaanilisele ajakonstandile, lihtsale konstruktsioonile, sujuvale ja müratule liikumisele ning raadiohäirete

puudumisele on õõnesrootoriga servomootorid leidnud väga laialdast kasutamist mitmesugustes seadmetes.

Tahhogeneraatorid on ette nähtud mehaanilise pöörlemise muundamiseks elektriliseks signaaliks (pingeks).

Praktikas leiavad kasutamist nii vahelduvvoolu- kui ka alalisvoolu-tahhogeneraatorid, kuid siinkohal vaatleme peamiselt esimest liiki masinaid, mida viimasel ajal kasutatakse sagedamini.

Tahhogeneraatorite poolt tekitatud emj. (pinge) peab olema võrdeline pöörlemiskiirusega, s. t.

$$E = C\Omega = c\frac{d\alpha}{dt}, \qquad (31\text{-}7)$$

kus C — tahhogeneraatori konstant,

Ω — võlli nurkkiirus, mis on võrdne võlli pöördenurga α esimese tuletisega.

Seos (31-7) määrab kindlaks nn. ideaalse tahhogeneraatori väljumiskarakteristiku. Siit nähtub tahhogeneraatori kasutamise võimalus ka arvutusseadmetes elektrilise diferentsiaatorina ja samuti kiirendavate või aeglustavate signaalide saamiseks.

Tegelikult tekib tahhogeneraatori töötamisel mähistes vool, mis kutsub esile ankrureaktsiooni. Ankrureaktsiooni toimel lineaarsus E ja Ω vahel kaob, s. t. tekib amplituudiviga. Peale selle tekib vahelduvvoolu-tahhogeneraatorites veel faasiviga, mis seisab selles, et väljepinge faas muutub koormuse muutumisel.

Kui tahhogeneraator peab andma ainult kiirendavaid või aeglustavaid signaale, siis lubatav väljepinge kõrvalekaldumine lineaarsest moodustab 2 ... 4%. Töötamisel diferentseeriva lülina on lubatav amplituudiviga 0,3 ... 0,4% ja faasiviga 0,5 ... 1,0%. Tehniliselt on võimalik tänapäeval valmistada tahhogeneraatorit, mille väljepinge kõrvalekaldumine lineaarsest (amplituudiviga) moodustab 0,01% ja faasiviga ei ületa 0,1°, s. o. 6′.

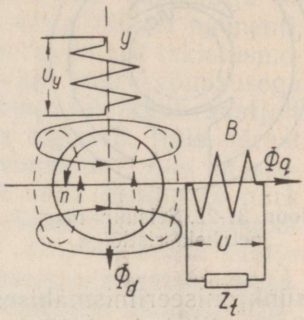
Ainukeseks kasutamiskõlblikuks vahelduvvoolu-tahhogeneraatoriks automaatikalülitustes on õõnesrootoriga asünkroon-tahhogeneraator. Niisuguse tahhogeneraatori ehitus ei erine millegi poolest eespool vaadeldud õõnesrootoriga servomootorist.

Asünkroon-tahhogeneraatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 31-21. Mähisele Y rakendatakse püsiva suuruse ja sagedusega pinge. Mähis B on lülitatud välisele koormustakistile Z_t.

Tahhogeneraatori tööpõhimõtet võib selgitada järgmiselt. Mähisele Y rakendatud vahelduvpinge U_y kutsub esile pulseeriva magnetvoo Φ_d. Seisva rootori ($n = 0$) korral indutseerib pulseeriv magnetvoog Φ_d rootori mähises emj. E_d nagu transformaatorigi korral tema sekundaarmähises. Antud emj. E_d mõjul tekib mähises vool, mille poolt tekitatud magnetväli on Lenzi seaduse põhjal suunatud seda esilekutsuvale magnetvoole vastu (joon. 31-21 punktiirjoonega). Põhimagnetvoog Φ_d ja rootori voolu poolt

esilekutsutud magnetvoog tekitavad resulteeriva magnetvoo, mille suund ühtib voo Φ_d suunaga. Seisva rootori korral mähises B mingit elektromotoorset jõudu ei indutseerita, sest antud mähis asub selle magnetvooga Φ_d risti.

Kui panna rootor mingi välise jõu mõjul pöörlema, siis tema mähise juhtmed «lõikavad» magnetvälja Φ_d jõujooni. Seetõttu indutseeritakse rootori mähises emj. E_q, mille suund on määratud parema käe juhisega. Antud emj. E_q suurus on võrdeline rootori pöörlemiskiirusega n (nagu alalisvoolumasinagi korral ankrus indutseeritud emj.) ning omab toitepingega U_y sama sagedust. Selle emj. E_q mõjul tekib rootori mähises vool, mis kutsub esile temaga võrdelise magnetvoo Φ_q (joon. 31-21 pideva joonega). Magnetvoo Φ_q suurus on võrdeline rootori pöörlemiskiirusega n ja omab toitepingega sama sagedust. Selle magnetvoo Φ_q poolt indutseeritaksegi mähises B emj. U, mille suurus on seega võrdeline rootori pöörlemiskiirusega n ning omab toitepingega U_y sama sagedust.



Joon. 31-21. Asünkroontahhogeneraatori põhimõtteskeem ja tööpõhimõte

Kui mähis B on lülitatud koormustakistile Z_t (joon. 31-21), siis tekib temas vool, mis tekitab omakorda ankrureaktsiooni. Seega üldjuhul Φ_q tekitatakse emj. E_q ja väljepinge U poolt esilekutsutud voolude koosmõjul.

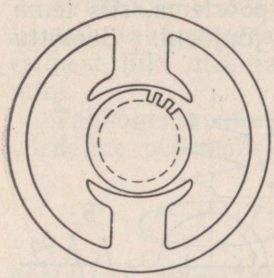
Sünkroonse sidestusega masinate ülesandeks on teostada sünkroonset ja sünfaasilist kahe võlli pööret või pöörlemist, kusjuures võllid pole omavahel mehaaniliselt sidestatud. Juhul kui on tarvis üle kanda väikest momenti (näit. mõõteriista osuti liigutamiseks), on meil tegemist sünkroonse indikaatorülekandega. Vastasel korral on tegemist sünkroonse jõuülekandega.

Sünkroonsidestuseks kasutatavaid asünkroonmasinaid nimetatakse selsüünideks (mis on tuletatud ingliskeelsest sõnast selfsynchronizing — isesünkroniseeriv) ja nende iseloomustavaks omaduseks on automaatne isesünkroniseerimine ühe pöörde piirides.

Selsüünid võib jagada kahte gruppi: kolmefaasilised ja ühefaasilised selsüünid.

Ühefaasiliste selsüünide ergutusmähiseid, mis enamasti on paigutatud staatorile, toidetakse ühefaasilisest võrgust. Sünkroniseerimismähised valmistatakse enamasti kolmefaasilistena, mis ruumiliselt on nihutatud üksteise suhtes 120° ja on paigutatud tavaliselt rootorile ning ühendatud tähte. Seda kolmefaasilist mähist läbivad aga voolud, mis ajaliselt on faasis.

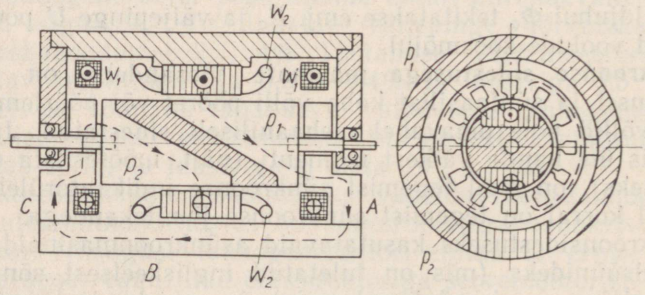
Sünkroniseerimismähis valmistatakse alati jaotatuna, mis asetatakse silindrilise rootori uurdeisse. Ergutusmähis võib olla valmistatud nii jaotatuna kui ka keskendatuna (nagu nähtavate poolustega masinate ergutusmähiski).



Joon. 31-22. Selsüüni magnetahela ristlõige

Rohkem on levinud keskendatud ergutusmähisega selsüünid. Endasünkroniseerimise saavutamiseks ühe pöörde ulatuses valmistatakse nad alati kahepooluselistena. Niisuguse selsüüni staatori ja rootori lõige on kujutatud joonisel 31-22. Poolusking haarab rootorit 120 ... 130° ulatuses ja omab kuju, mis võimaldab siinuselist väljajaotust õhupilus. Rootori uurded on nn. hambaharmooniliste mõju vähendamiseks kallutatud. Staator ja rootor koostatakse elektrotehnilisest lehtterasest.

Otste väljatoomine rootoril asetsevast sünkroniseerimismähisest toimub kontaktrõngaste ja harjade abil. Seega toodud selsüünide suureks puuduseks on liugkontaktid, mis põhjustavad hõõrdekadude suurenemist, üleminekutakistust harjade ja kontaktrõngaste vahel ja ekspluatatsioonikindluse vähenemist. Viimasel ajal leiavad üha laialdasemat kasutamist kontaktideta selsüünid. Esimesed seda tüüpi masinad töötati välja nõukogude teadlaste A. Josifijani ja D. Svetšarniku poolt. Niisuguse



Joon. 31-23. Kontaktideta selsüüni piki- ja ristlõige

selsüüni põhimõtteline ehitus on näidatud joonisel 31-23. Rootor, millel ei asu mingit mähist, koosneb kahest elektrotehnilisest terasest koostatud plekipakist p_1 ja p_2, mis on teineteisest eraldatud mittemagnetilisest materjalist vaheseinaga (viirutatud osa). Staatoril asub rõngakujuline ergutusmähis w_1 ja staatori plekipakisse stantsitud uurdeis jaotatud kolmefaasiline sünkroniseerimismähis w_2. Pulseeriva magnetvälja jõujooned, mis tekitatakse ergutusmä-

hise poolt, väljudes rootori ühest poolusest p_1, läbivad välise magnetahela ABC ja tulles vastasseinast poolusesse p_2, lähevad siis läbi staatori magnetahela poolusesse p_1 tagasi.

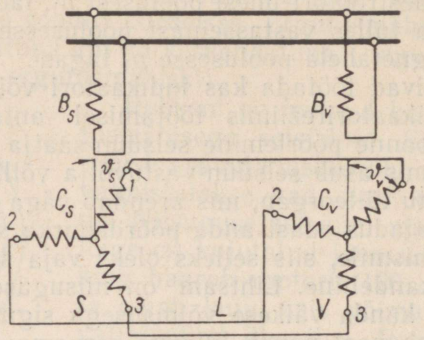
Selsüünid võivad töötada kas indikaatori või transformaatori töörežiimis. Indikaatorireżiimis töötamisel antakse sünkroonne pööre või sünkroonne pöörlemine selsüün-saatja poolt edasi indikaatori osutile, mis asub selsüün-vastuvõtja võllil. Vastuvõtja ise on seekord vahetu täiteorgan, mis arendab väga väikest momenti. Kui aga tekib vajadus edasi anda pöördenurka suure takistusmomendiga mehhanismile, siis selleks oleks vaja suure võimsusega selsüüne ja ülekandeliine. Lihtsam on niisugusel juhul saatjalt vastuvõtjale üle kanda väikese võimsusega signaali, mis pärast võimendamist kohapeal paneb liikuma servomootori, mis on seotud vastava ajamiga ja millele tuleb edasi anda ülekantav nurk või pööre. Seega peab edasiantav signaal olema nurga funktsiooniks. Niisugust selsüünide tööreżiimi, mil antakse edasi saatja pöördenurgaga võrdeline signaal, nimetatakse transformatoorseks. Allpool vaadeldakse kummagi tööreżiimi füüsikalist olemust lähemalt.

Kolmefaasilised selsüünid ei erine millegi poolest tavalistest asünkroonmasinatest, mis omavad nii staatoris kui ka rootoris kolmefaasilisi jaotatud mähiseid. Rootori mähis, mis siin on sünkroniseerivaks mähiseks, on välja toodud kontaktrõngastele analoogiliselt faasirootoriga asünkroonmootorile.

Kolmefaasilisi selsüüne kasutatakse ainult suhteliselt suurte võimsuste edasiandmiseks nn. «elektrilise võlli» süsteemides, kui on vajalik kahe eraldiseisva mootori täpne sünkroonne pöörlemine (näit. silla tõsteseadmed, portaalkraana nihutamisseadmed, paberimasina ajamid jne.). Niisugusel juhul paigutatakse põhitöömootoritega samadele võllidele abimasinad (kolmefaasilised «selsüünid»), mille staatori mähised lülitatakse võrku, kuid rootori mähised omavahel. Sel puhul puudub vahe saate- ja vastuvõtusüsteemi vahel ning mõlemad masinad korrigeerivad vastastikust asendit. Seepärast neid sageli ei nimetatagi selsüünideks, kuigi nad oma ehituse ja vastastikuse sidestuse teostamise põhimõtte järgi millegi poolest ei erine selsüünidest.

Ühefaasilise selsüüni režiimid. Kahe selsüüni indikaatorireżiimi põhimõtteskeem on näidatud joonisel 31-24. Saatja S ja vastuvõtja V ergutusmähised B_s ja B_v on lülitatud ühisesse toitevõrku. Sünkroniseerivad mähised C_s ja C_v on ühendatud omavahel sideliini L abil.

Ergutusmähiseid B_s ja B_v toidetakse ühefaasilise vahelduvvooluga, mis kutsub esile kummagi masina magnetahelas pulseeriva ühefaasilise magnetvoo. See pulseeriv magnetvoog indutseerib rootori kolmefaasilises mähises ühesugust faasi omavad elektromotoorsed jõud, mis erinevad ainult oma suuruse poolest vastavalt erinevale asetusele ergutusmähise suhtes. Maksimaalne



Joon. 31-24. Ühefaasiliste selsüünide töötamine indikaatorirežiimis

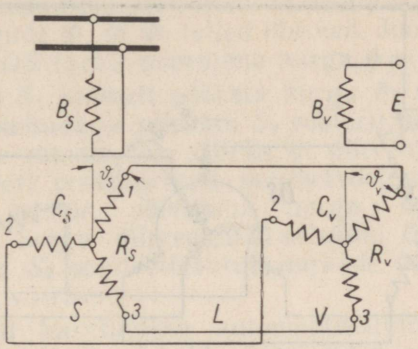
emj. väärtus esineb rootori mähises, mille telg vaadeldaval momendil ühtib staatori ergutusmähise teljega.

Kahe selsüüni üksikud rootori faasimähised on lülitatud üksteisele vastu. Seega nende ühesuguse asetuse puhul ergutusmähise suhtes on neis indutseeritud elektromotoorsed jõud suuruselt võrdsed, kuid vastassuunalised. Selle tulemusel üksikute faaside elektromotoorsete jõudude vahe ja järelikult ka vool rootori kolmefaasilises mähises on võrdne nulliga. Kuna täiesti ühesuguseid masinaid pole võimalik valmistada, siis elektromotoorsete jõudude vahe pole kunagi võrdne nulliga, vaid erineb õige vähe sellest ning rootori mähises on teatav nõrk vool, mis siiski tööprotsessi oluliselt ei mõjuta.

Juhul kui saatja ja vastuvõtja rootori mähised on pööratud ergutusmähiste suhtes erinevate nurkade (ϑ_s ja ϑ_v) võrra, siis saatja ja vastuvõtja rootori vastavate faaside elektromotoorsed jõud pole võrdsed ning elektromotoorsete jõudude vahe kutsub esile voolu. Nende voolude ja ergutusmähise poolt tekitatud magnetvoo koosmõjul tekitatakse saatja ja vastuvõtja võllidel sünkroniseeriv moment. Kui pöörata saatja võll vastuvõtja suhtes teatava nurga ϑ_s võrra ja kinnitada selles asendis, siis vastuvõtja võllil tekkiv sünkroniseeriv moment püüab pöörata vastuvõtja rootorit sama nurga võrra. Hõõrdekadude ja vastuvõtja võllile mõjuvate takistusmomentide tõttu pöördub vastuvõtja võll saatjast erineva nurga ϑ_v võrra. Vahet $\vartheta_s - \vartheta_v$, mis tekib pärast staatilise olukorra saavutamist ja pärast pööret, nimetatakse selsüüni staatiliseks veaks. Olenevalt tekkivast staatilisest veast jaotatakse selsüünid täpsusklassidesse. Näiteks I täpsusklassi kuuluvate saatjate staatiline viga ei tohi ületada $\pm 0{,}25°$, II täpsusklassi kuuluvate saatjate nurgaviga — $\pm 0{,}25° \ldots 0{,}5°$; vastuvõtjate lubatavad staatilised vead on I klassi korral — $\pm 0{,}75°$, II klassi korral $\pm 0{,}75 \ldots 1{,}5°$.

Kui saatja on kinnitatud nullasendis ja vastuvõtja võlli pöörata mingi nurga võrra, siis tekkiv sünkroniseeriv moment püüab viimase võlli pöörata tagasi nullasendisse.

Seega kui saatja ja vastuvõtja selsüünide võllide asendid teineteisest erinevad, siis nende võllidele mõjuvad vastassuunalised sünkroniseerivad momendid püüavad selsüüne viia sünfaasilisse asendisse, s. o. asendisse, mil $\vartheta_s = \vartheta_v$.



Joon. 31-25. Selsüünide tööskeem transformaatorirežiimis

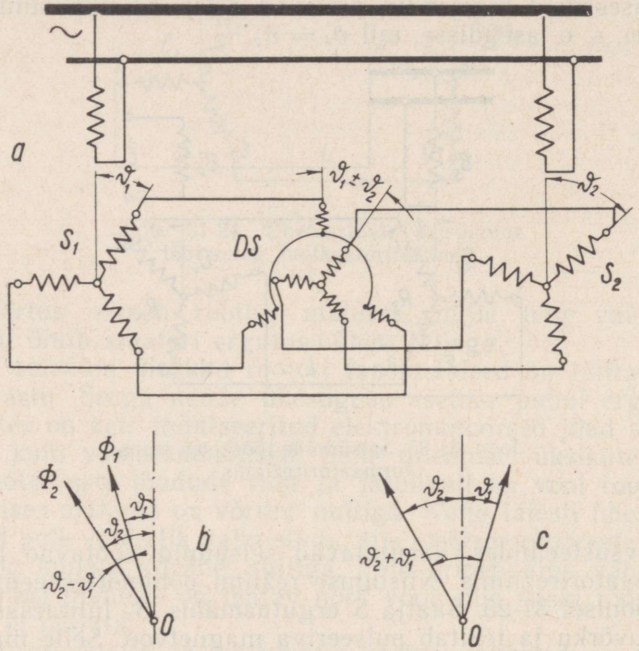
Jälgivsüsteemides kasutatavad selsüünid töötavad harilikult trasformaatorirežiimis. Niisuguse režiimi põhimõtteskeem on näidatud joonisel 31-25. Saatja S ergutusmähis B_s lülitatakse vahelduvvooluvõrku ja tekitab pulseeriva magnetvoo. Selle magnetvoo poolt indutseeritakse saatja rootori mähises R_s emj., mille suurus oleneb rootori pöördenurgast ϑ_s ja mis tekitab saatja R_s ja vastuvõtja R_v rootori mähistes neile emj. väärtustele vastavad voolud. Nende voolude poolt tekitatakse vastuvõtjas pulseeriv magnetväli, mis indutseerib vastuvõtja ühefaasilises mähises B_v emj., mille suurus oleneb vastuvõtja rootori ja staatori mähise vahelisest nurgast ϑ_v. See vastuvõtja väljepinge juhitakse tavaliselt jälgivajami võimendajasse.

Transformaatorirežiimis töötavaid selsüüne nimetatakse transformaator-selsüünideks ja neid kasutatakse laialdaselt jälgivsüsteemides käsklus- ja täitevorganite võllide vahelise nurga diferentsiaal-mõõteelemendina.

Diferentsiaal-selsüün on oma konstruktiivse ehituse poolest analoogiline kolmefaasilise asünkroonmasinaga, mille staatoril ja rootoril asub kolmefaasiline jaotatud mähis, mis on tähtühenduses ja mille üksikute faaside teljed moodustavad 120°. Kolmefaasiline rootori mähis tuuakse välja kontaktrõngaste ja harjade kaudu.

Diferentsiaal-selsüüni kasutatakse sünkroonse sidestuse süs-

teemis juhul, kui indikaatorlülitus või jälgivajam peavad reageerima kahe etteantud nurga summale või vahele. Sel puhul lülitatakse diferentsiaal-selsüün nurka etteandvate selsüünide rootoriahelasse nii, nagu see on näidatud joonisel 31-26, *a*. Selle skeemi järgi võib diferentsiaal-selsüün töötada kas saatjana või vastu-



Joon. 31-26. Indikaatornurga ülekandmine diferentsiaal-selsüüni abil:
a — skeem; *b* ja *c* — diferentsiaal-selsüüni magnetvoogude Φ_1 ja Φ_2 asendid

võtjana. Kui pidurdada diferentsiaal-selsüüni rootor, siis viimane muutub transformaatoriks ning nurga edasiandmine toimub nagu tavalise indikaatorlülituse korral (joon. 31-24).

Vaatleme juhtu, kus selsüünid S_1 ja S_2 töötavad saatjatena ja diferentsiaalselsüün *DS* vastuvõtjana.

Selsüünide S_1 ja S_2 rootorite pööramisel mingi nurga võrra tekib neis ja nendega ühendatud diferentsiaal-selsüüni *DS* mähistes voolud, mis on võrdelised vastavate elektromotoorsete jõudude väärtustega.

Diferentsiaal-selsüüni staatori ja rootori mähistes voolavad voolud tekitavad vastavalt staatori ja rootori resulteeriva magnetvoo. Nende magnetvoogude teljed on nihutatud algasendi suhtes selsüünide S_1 ja S_2 etteantud nurkade ϑ_1 ja ϑ_2 võrra.

Kui selsüüni S_1 rootorit pöörata nurga ϑ_1 võrra kellaosuti liikumise suunas, siis diferentsiaal-selsüüni *DS* staatori mähise poolt tekitatud resulteeriva magnetvoo Φ_1 telg pöördub vastassuunas nurga ϑ_1 võrra (joon. 31-26,*b*). Selsüüni S_2 rootori pööramisel nurga ϑ_2 võrra pöördub diferentsiaal-selsüüni *DS* rootori resulteeriva magnetvoo Φ_2 telg nurga ϑ_2 võrra vastassuunas.

Selsüüni *DS* staatori ja rootori magnetvoogude koosmõjul tekib pöördemoment, mis püüab selsüüni *DS* rootorit pöörata asendisse, kus magnetvoogude Φ_1 ja Φ_2 teljed ühtivad. Joonisel 31-26, *b* toodud juhul peab *DS* rootor pöörduma nurga $\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$ võrra.

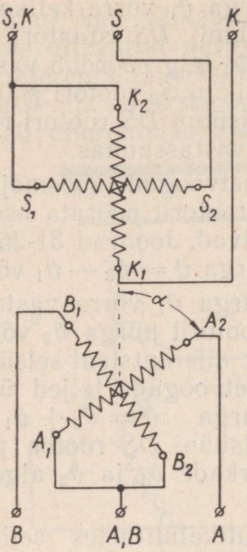
Kui selsüüni S_1 rootorit pöörata nurga ϑ_1 võrra vastu kellaosuti liikumise suunda ja selsüüni S_2 rootorit nurga ϑ_2 võrra kellaosuti liikumise suunas, siis selleks, et diferentsiaal-selsüüni *DS* staatori ja rootori resulteerivate magnetvoogude teljed ühtiksid, peab viimase rootor pöörduma nurga $\vartheta = \vartheta_2 + \vartheta_1$ võrra (joon. 31-26,*c*). Seega diferentsiaal-selsüüni *DS* rootor pöördub selsüünide S_1 ja S_2 poolt etteantud nurkade ϑ_1 ja ϑ_2 algebralise summa $\vartheta_1 \pm \vartheta_2$ võrra.

Pöördtrafosid kasutatakse automaatikalülitustes selleks, et saada väljepingeid, mis oleksid võrdelised mingi etteantud pöördenurga α nurgafunktsiooniga, näiteks $\sin \alpha$ või $\cos \alpha$, või antud nurgaga α.

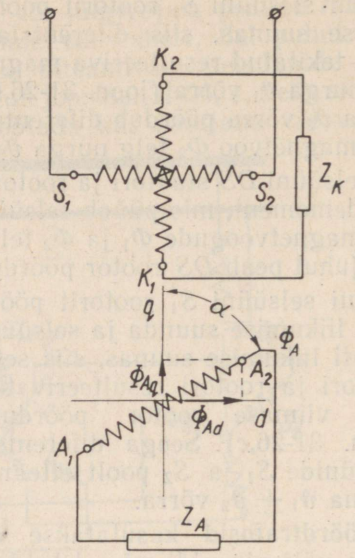
Konstruktiivse kujunduse poolest on pöördtrafo sarnane faasirootoriga asünkroonmasinaga.

Tavaliselt paigutatakse staatorisse ja rootorisse kaks teineteise suhtes 90° (elektrilise) võrra nihutatud mähist. Niisuguse pöördtrafo mähiste ruumilise asetuse põhimõtteskeem on näidatud joonisel 31-27. Siin S_1-S_2 — staatori peamähis; K_1-K_2 — staatori abimähis; A_1-A_2 ja B_1-B_2 — rootori siinus- ja koosinusmähis (nimetused vastavalt väljepinge muutumisseadusele, olenevalt pöördenurgast α). Väljejuhtmete arvu vähendamiseks ühendatakse tavaliselt staatori ja rootori mähised ühepoolselt masina sees (joon. 31-27). Rootori pööramine staatori suhtes mingi vabalt ette antud nurga α võrra toimub täpse reduktormehhanismi abil.

Vaatleme pöördtrafo töörežiimi siinustransformaatorina. Selleks oletame, et staatoril asub ainult peamähis S_1-S_2, rootoril aga ainult siinusmähis A_1-A_2. Masin on sellise konstruktsiooniga, et rootori mähist läbiv magnetvoog sõltub pöördenurgast α siinuseliselt. Olenevalt pöördenurgast muutub siis siinuseliselt ka rootori mähises A_1-A_2 indutseeritud emj. Kui niisuguse siinustransformaatori rootoriahelasse on lülitatud välistarbija, siis rootori mähises tekkiv vool kutsub esile ankrureaktsiooni, mistõttu väljepinge kaotab siinuselise sõltuvuse nurgast α. Ankrureaktsiooni mõju kompenseerimiseks lülitatakse staatoril asuv kompensatsioonimähis K_1-K_2 välistakistusele. Mähise K_1-K_2 tegevuse selgitamiseks lahutame rootori mähise A_1-A_2 poolt tekitatud magnetvoo Φ_A



Joon. 31-27. Pöördtrafo mähiste ruumilise asetuse põhimõtteskeem



Joon. 31-28. Kompensatsioonimähise tegevuse selgitamiseks

kaheks komponendiks: Φ_{Aq} — rootori ankrureaktsiooni põikimagnetvoog ja Φ_{Ad} — rootori ankrureaktsiooni pikimagnetvoog (joon. 31-28). Pikimagnetvoog Φ_{Ad} on suunalt staatori peamähise S_1-S_2 poolt tekitatud põhimagnetvoole vastupidine ja vähendab ainult rootori pinge absoluutväärtust. Rootori pinge kõrvalekaldumise siinuselisest (olenevalt pöördenurgast α) kutsub esile põikimagnetvoog Φ_{Aq}. Selle magnetvoo poolt indutseeritakse kompensatsioonimähises K_1-K_2 emj., mis on võrdeline magnetvoo Φ_{Aq} suurusega. Kui lülitada mähis K_1-K_2 niisugusele välistakistusele, et tekkiv vool kutsuks esile põikimagnetvooga Φ_{Aq} sama suuruse, kuid vastassuunalise magnetvoo, siis sellega ongi kompenseeritud rootori mähise A_1-A_2 poolt tekitatud põiki-ankrureaktsioon. Niisugust rootori mähise poolt tekitatud ankrureaktsiooni kompenseerimisviisi nimetatakse primaarseks sümmetreerimiseks. Samaks otstarbeks võib kasutada ka rootoril asuvat mähist B_1-B_2, kui viimane lülitada vastavale välistakistusele. Seda ankrureaktsiooni kompenseerimisviisi nimetatakse sekundaarseks sümmetreerimiseks. Paremaid tulemusi annab üheaegne sümmetreerimine nii transformaatori primaar- kui ka sekundaarpoolelt.

Kui kasutada rootori väljemähisena mähist B_1-B_2, saame koosinustransformaatori, mille põhimõtteskeem ei erine millegagi ülalkirjeldatud siinustransformaatori tööskeemist.

Väljepinge lineaarse sõltuvuse saamiseks nurga α muutumisel väikestes piirides võime kasutada ülaltoodud siinustransformaatori tööskeeme, kusjuures reguleerimine toimub ainult emj. kõvera algosas, mida võib teatava lähendusega lugeda lineaarseks ($\alpha \leqslant 4{,}5°$). Kui on vaja saada väljepinge lineaarset sõltuvust suuremates nurga α muutumise piirides, siis kasutatakse selleks pöördtrafo mähiste spetsiaalseid ühendusskeeme.

XXXII PEATÜKK

SÜNKROONMASINA ANKRUREAKTSIOON

32-1. SÜNKROONMASINA ANKRUREAKTSIOONI FÜÜSIKALINE OLEMUS

Sünkroonmasina ehituse ja töötamispõhimõttega tutvusime juba varem (p. 20-4). Järgnevalt õpime sünkroonmasinaid tundma lähemalt.

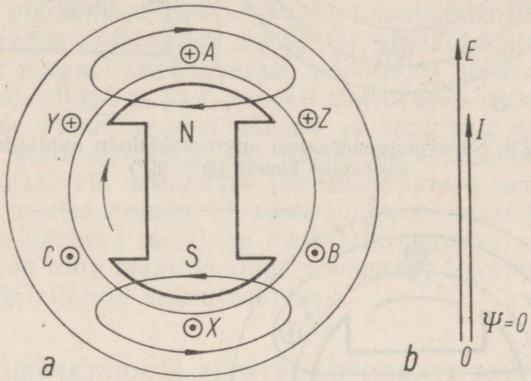
Sünkroonmasina ankru- ehk vahelduvvoolumähise koormamisel vooluga tekib ankru magnetväli, mis mõjutab ergutusmähise poolt loodud magnetvälja, tekitades viimasega koos masina resulteeriva magnetvälja. Sünkroonmasina ankru mähise voolu mõju masina magnetväljale nimetatakse nagu alalisvoolumasinate puhulgi ankrureaktsiooniks.

Ankrureaktsiooni mõju sünkroonmasinates on palju suurem kui alalisvoolumasinates. Põhjus seisab selles, et alalisvoolumasinates on harjad tavaliselt paigutatud geomeetrilisele neutraaljoonele, ankrureaktsioon tegutseb seega masina põikiteljes ja tema mõju pooluste magnetvoole ning ankru elektromotoorsele jõule on võrdlemisi väike. Sünkroonmasinais aga, nagu selgub allpool, esineb olenevalt koormuse iseloomust tugev piki- ehk poolusteljeline ankrureaktsioon, mis oluliselt mõjutab masina magnetvoogu ja seega ka ankru emj. suurust. Kõik sünkroonmasina tähtsamad omadused nii statsionaarsetes kui ka siirderežiimides olenevad kõigepealt ankrureaktsiooni toimest. Seepärast on sünkroonmasina ankrureaktsiooni tundmaõppimine määrava tähtsusega. Käesolevas peatükis käsitletakse kolmefaasilise või üldse mitmefaasilise sünkroonmasina ankrureaktsiooni sümmeetrilises statsionaarses töörežiimis. Kuna sünkroonmasinaid kasutatakse peamiselt generaatoritena, siis ankrureaktsiooni vaadeldakse kõigepealt viimaste seisukohalt. Saadavad tulemused on aga kergesti ülekantavad ka sünkroonmootoritele.

Tutvume nüüd sünkroonmasina ankrureaktsiooni füüsikalise iseloomuga. Nagu eelnevas selgitati (p. 20-4), tekib kolmefaasilise sünkroonmasina koormamisel sümmeetriliste vooludega mmj., õigemini selle põhiharmooniline, mis pöörleb sünkroonselt rootoriga, püsides viimase suhtes paigal. Selgus ka, et hetkel, mil vool

mingis mähise faasis omab maksimaalväärtust, on kogu mähise mmj. või voog suunatud sama faasi telje suunas. Seepärast võime allpool lihtsuse mõttes vaadelda ainult kolmefaasilise mähise üht faasi hetkel, kui ta vool on maksimaalne. Seejuures kujutame lihtsuse mõttes faasimähise ühekeerulisena.

Joonisel 32-1, *a* on näidatud kahepooluseline sünkroongeneraator hetkel, kui faasis *A* induktori poolt indutseeritud emj. omab amplituudväärtust ning nihkenurk ψ selle emj. *E* ning ankru voolu *I* vahel on null (joon. 32-1, *b*). Seega joonisel 32-1 esitatud hetkel



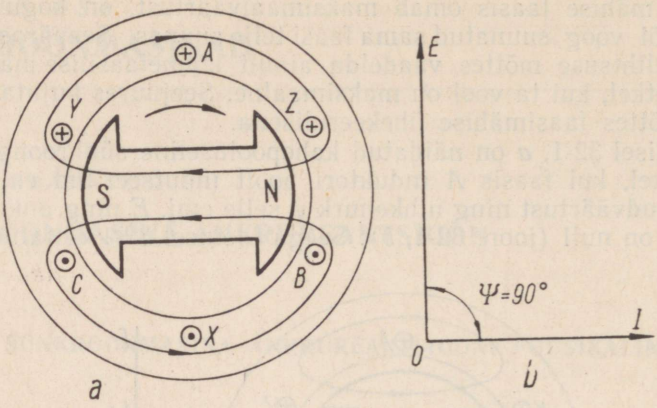
Joon. 32-1. Sünkroongeneraatori ankrureaktsioon juhul, kui $\psi = \sphericalangle (E, I) = 0$

on ka faasi *A* vool maksimaalne. Sümmeetrilisel koormusel, nagu me eeldasime, on siis ankrureaktsiooni voog suunatud *A* faasi telje sihis. Jooniselt 32-1, *a* selgub ka, et antud juhul ankrureaktsioon tegutseb põikiteljes ning ankrureaktsiooni voog kulgeb peamiselt läbi pooluskingade.

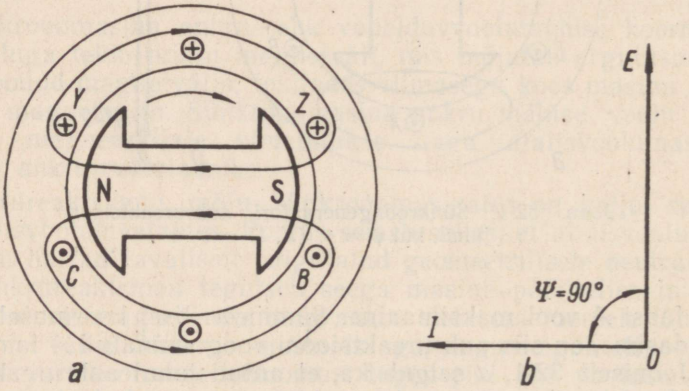
Oletame nüüd (joon. 32-2, *b*), et sünkroongeneraatori koormusvool *I* on induktori poolt indutseeritud emj. *E* suhtes puhtinduktiivne ($\psi = 90°$). Sel juhul voolu maksimum faasis *A* saabub võrreldes joonisel 32-1, *a* esitatud olukorraga veerand perioodi võrra hiljem, seega siis, kui rootor on juba pöördunud 90° võrra (joon. 32-2, *a*). Ankrureaktsiooni voog tegutseb nüüd poolustesihis ehk pikiteljes, mõjutades poolusi lahtimagneetivalt.

Kui aga vool *I* on emj. *E* suhtes 90° võrra ees ($\psi = -90°$), saavutab faasi *A* vool maksimumi võrreldes joonisel 32-1, *a* esitatud juhtumiga veerand perioodi võrra varem. Rootori asend hetkel, mil faasi *A* vool on maksimaalne, on esitatud vaadeldava juhtumi jaoks joonisel 32-3, *a*. Nagu selgub, tegutseb nüüd ankrureaktsioon samuti pikiteljes, kuid magneetivalt.

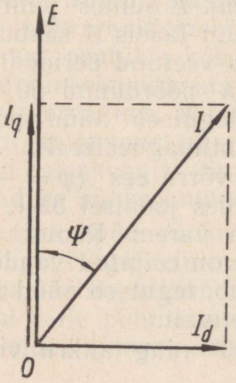
Üldjuhul nihkenurk ψ pole 0 ega ka 90° ning ankru voolu *I*



Joon. 32-2. Sünkroongeneraatori ankrureaktsioon puhtinduktiivse koormuse korral ($\psi = 90°$)



Joon. 32-3. Sünkroongeneraatori ankrureaktsioon puhtmahtuvusliku koormuse korral ($\psi = -90°$)



Joon. 32-4. Sünkroongeneraatori ankru voolu piki- ja põikikomponendid (I_d, I_q)

võib jaotada kaheks komponendiks (joon. 32-4), millest üks

$$I_q = I \cos \psi \qquad (32\text{-}1)$$

on faasis induktori poolt ankru mähises indutseeritud elektromotoorse jõuga E ning loob *põikiteljelise ankrureaktsiooni voo* Φ_{aq}, teine komponent

$$I_d = I \sin \psi \qquad (32\text{-}2)$$

aga on risti elektromotoorse jõuga E ning loob *pikitelje ankrureaktsiooni voo* Φ_{ad}. Voolu I_q nimetatakse *ankru voolu põikikomponendiks*, I_d aga *pikikomponendiks*. Voolu I komponentideks I_q ja I_d jaotamise vajadus on tingitud ka sellest, et nähtavate poolustega masinates on magnetiline takistus põikiteljes suurem ning seepärast võrdsed voolud I_q ja I_d loovad ebavõrdsed vood Φ_{aq} ja Φ_{ad}. Siirderežiimide puhul on veel oluline, et voog Φ_{ad} aheldub ergutusmähisega, kuna aga voog Φ_{aq} viimasega ei aheldu.

Sünkroonmasinate omaduste tundmaõppimise seisukohalt on väga oluline meeles pidada, et sünkroongeneraatori koormamisel induktiivse iseloomuga tarbijaga tekib lahtimagneetiv pikiteljeline ankrureaktsioon ning mahtuvusliku iseloomuga koormuse puhul — magneetiv pikiteljeline ankrureaktsioon.

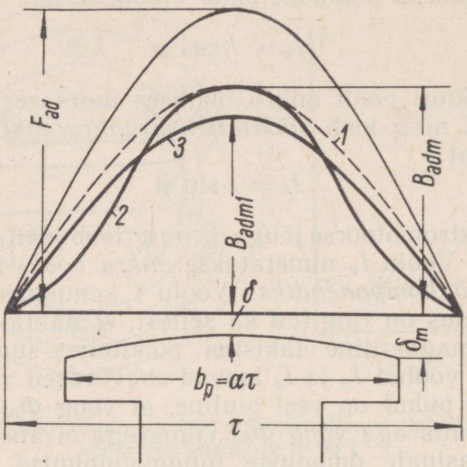
32-2. ANKRUREAKTSIOONI ELEKTROMOTOORSED JÕUD JA INDUKTIIVTAKISTUSED

Ankrureaktsiooni magnetväli õhupilus. Ankrureaktsiooni mmj. põhiharmoonilise poolt tekitatud vood Φ_{ad} ja Φ_{aq} pöörlevad koos poolustega ja indutseerivad ankru mähises emj., mis oma olemuselt on selle mähise endainduktsiooni emj. ning mis avaldavad masina töörežiimidele tõsist mõju. Vaatleme seda küsimust lähemalt.

Pikiteljeline vool I_d tekitab ankru pinnal siinuseliselt jaotatud mmj., mille põhiharmoonilise amplituud

$$F_{ad} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{wk_w}{p} I_d. \qquad (32\text{-}3)$$

See mmj. pöörleb sünkroonselt poolustega ning tema maksimum langeb kokku pikiteljega (joon. 32-5). Nähtavate poolustega masinate puhul ei ole õhupilu staatori ja rootori vahel ühtlane, sest naaberpooluste kingade vahel esinevad suuremad õhuvahed ning pooluste voo võimalikult siinuselise jaotumise saavutamiseks pooluskingad tavaliselt kujundatakse muutuva kõrgusega. Õhupilu suurima δ_m ja vähima δ väärtuse suhe on tavaliselt 1,0 kuni 2,0 piires. Ühtlase õhupilu puhul tekitaks siinuseliselt jaotatud mmj. ankru pinnal siinuseliselt jaotatud magnetilise induktsiooni B (joon. 32-5, kõver *1*). Kuna aga õhupilu pooluskingade servade



Joon. 32-5. Pikiteljelise ankrureaktsiooni magnetväli õhupilus

läheduses suureneb, siis B kõver kujuneb mittesiinuseliseks (joon. 32-5, kõver *2*). Kui õhupilu väärtus pooluskinga keskel mõlemal juhul on ühesugune, siis on mõlemal juhul sama ka induktsiooni maksimaalväärtus B_{adm}.

Väljakõvera *2* võime lahutada harmoonilisteks, millest joonisel 32-5 on esitatud põhiharmooniline amplituudiga B_{adm1} (kõver *3*). Kõik väljaharmoonilised liiguvad sama kiirusega nagu rootorgi. Vastavalt indutseerib esimene väljaharmooniline ankru mähises põhisagedusega emj., kuna aga kolmas, viies jne. harmooniline indutseerib kolme-, viie- jne. kordse sagedusega emj. Ankrureaktsiooni magnetvälja kõrgemad harmoonilised on üldiselt põhiharmoonilisest nõrgemad. Peale selle kujundatakse vahelduvvoolumähised selliselt, et nad aitavad vähendada magnetvälja kõrgemate harmooniliste poolt indutseeritud elektromotoorset jõudu. Seega on staatori mähises indutseeritud emj. kõrgemad harmoonilised suhteliselt vähese tähtsusega ning, nagu näitavad praktilised kogemused, võib neid mitte arvestada. Vastavalt joonisele 32-5 võime arvestada ainult pikiteljelise ankrureaktsiooni välja põhiharmoonilist (kõver *3*) ning tema poolt ankru mähises indutseeritud elektromotoorset jõudu, mida nimetame *pikitelje ankrureaktsiooni emj.* ning tähistame E_{ad}.

Tegur

$$k_{tad} = \frac{B_{adm1}}{B_{adm}} \qquad (32\text{-}4)$$

näitab, kui palju väheneb õhupilu ebaühtluse tõttu pikitelje ankrureaktsiooni magnetvälja esimene harmooniline ning vastav emj.

E_{ad}. Seda tegurit k_{ad} nimetatakse *pikitelje ankrureaktsiooni väljateguriks*; ta väärtus oleneb pooluskingade geomeetrilistest vahekordadest, täpsemini (vt. joon. 32-5) suhtest δ_m/δ, edasi suhtelisest pooluskinga laiusest

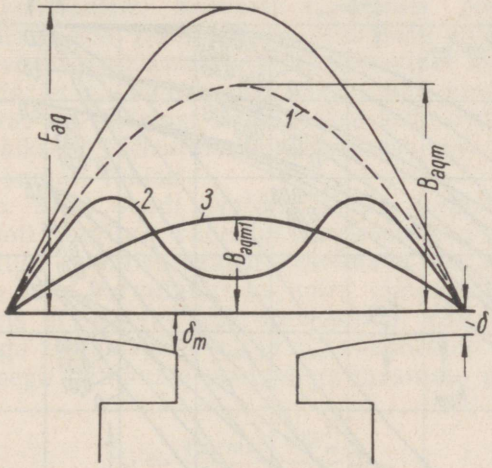
$$\alpha = \frac{b_p}{\tau}$$

ning veel suhtest δ/τ.

Põikiteljelise ankrureaktsiooni mmj. amplituud

$$F_{aq} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{wk_w}{p} I_q \qquad (32\text{-}5)$$

ning suunalt langeb kokku põikiteljega, s. t. poolustevahelise keskjoonega (joon. 32-6). Ühtlase õhupilu δ puhul oleks ka magnetilise



Joon. 32-6. Põikiteljelise ankrureaktsiooni magnetväli õhupilus

induktsiooni B kõver siinuseline (joon. 32-6, kõver *1*), tegelikult aga pooluste vahemiku kohal B tublisti väheneb (kõver *2*). Eraldades viimasest põhiharmoonilise (kõver *3*), saame magnetvälja, mis indutseerib ankrumähises põhisagedusega *põikiteljelise ankrureaktsiooni emj.* E_{aq}. Praktikas väljakõvera *2* (joon. 32-6) kõrgemaid harmoonilisi nagu pikiteljelise ankrureaktsiooni puhulgi ei arvestata.

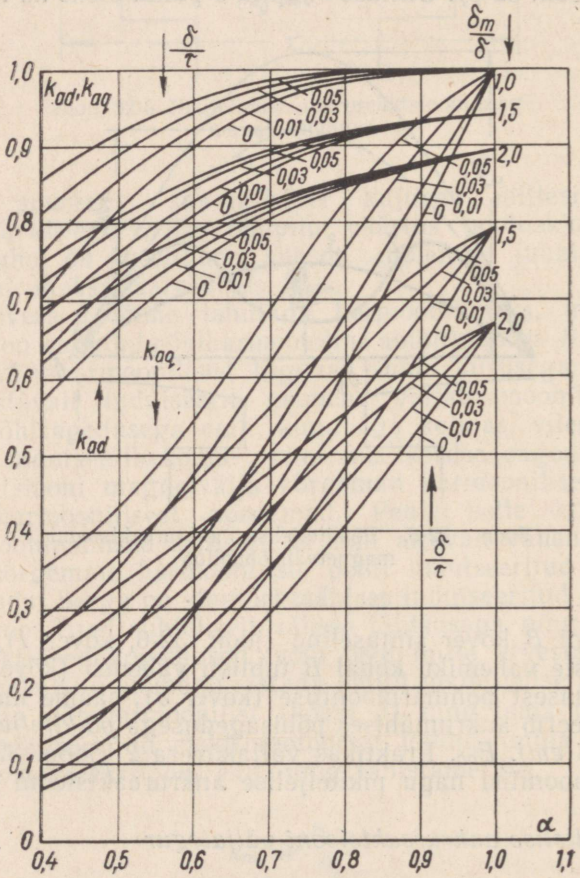
Põikiteljelise ankrureaktsiooni väljategur

$$k_{aq} = \frac{B_{aqm1}}{B_{aqm}} \qquad (32\text{-}6)$$

näitab (joon. 32-6), kui palju väheneb põikiteljelise ankrureaktsiooni magnetilise induktsiooni amplituud õhupilu ebaühtluse mõjul.

Tegurite k_{ad} ja k_{aq} kõverad nähtavate poolustega masinatele on esitatud joonisel 32-7 sõltuvalt suhtelisest pooluskinga laiusest mitmesuguste $\frac{\delta_m}{\tau}$ ja $\frac{\delta}{\tau}$ juures. Tegurite väärtused on määratud õhupilu väljapiltide joonestamise alusel. Tavaliselt $\alpha = 0{,}60 \ldots 0{,}75$ ning $k_{ad} = 0{,}85 \ldots 0{,}95$ ja $k_{aq} = 0{,}45 \ldots 0{,}6$. On loomulik, et õhupilu ebaühtlus tugevamini mõjutab põikiteljelist magnetvälja, mistõttu $k_{aq} < k_{ad}$.

Nähtamatute poolustega masinatel (näiteks turbogeneraatoritel) on õhupilu ühtlane ning seepärast nendel $k_{ad} = k_{aq} = 1$.



Joon. 32-7. Piki- ja põikitelje ankrureaktsiooni väljategurid k_{ad} ja k_{aq}

Ankrureaktsiooni takistused. Põhisagedusega ankrureaktsiooni emj. E_{ad} ja E_{aq} on sisuliselt ankru endainduktsiooni emj. ja neid võib arvesse võtta vastavate induktiivsete takistuste abil, nagu igasuguseid endainduktsiooni elektromotoorseid jõude. Küllastuse puudumisel magnetahelas on E_{ad} ja E_{aq} võrdelised vooludega I_d ja I_q ning nimetatud takistused on konstantsed. Seega võime kirjutada:

$$E_{ad} = x_{ad} I_d,$$

$$E_{aq} = x_{aq} I_q.$$

Induktiivset takistust x_{ad} nimetatakse *pikitelje ankrureaktsiooni takistuseks* ning x_{aq} — *põikitelje ankrureaktsiooni takistuseks.*

Takistust x_{aq} võib lugeda praktiliselt sõltumatuks küllastusest, sest põikitelje ankrureaktsiooni voog kulgeb läbi suhteliselt suurte õhuvahemike ning magnetiline takistus sellele voole on seetõttu praktiliselt konstantne. Seevastu x_{ad} oleneb pooluste ja ankru südamike küllastusest. Kuna iga elektrimasina puhul pinge oleneb tema magnetvoost ning samal ajal ka küllastuse aste sõltub voost, siis võib öelda, et x_{ad} oleneb sünkroonmasina pingest. Nimipinge juures esinevat x_{ad} väärtust nimetatakse küllastatuks ning ta on 10 . . . 20% väiksem küllastamata väärtusest, mis esineb madalatel pingetel, samuti lühisel.

Varem (p. 24-2) saadi avaldis (24-5) magnetvälja põhiharmoonilise poolt tingitud vahelduvvoolumähise induktiivtakistuse kohta. Mainitud avaldist saame rakendada ka ankrureaktsiooni takistuste x_{ad} ja x_{aq} arvutamiseks, viies täiendavalt sisse tegurid k_{ad} ja k_{aq}, mis arvestavad ankrureaktsiooni väljade põhiharmooniliste ja seega ka takistuste x_{ad} ja x_{aq} vähenemist õhupilu ebaühtluse tõttu. Seega nähtavate poolustega masinate puhul

$$x_{ad} = \frac{4\mu_0 f m \tau l}{\pi k_\delta k_\mu \delta} \cdot \frac{w^2 k_w^2}{p} k_{ad}, \qquad (32\text{-}7)$$

$$x_{aq} = \frac{4\mu_0 f m \tau l}{\pi k_\delta \delta} \cdot \frac{w^2 k_w^2}{p} k_{aq}. \qquad (32\text{-}8)$$

Takistuse x_{ad} sõltuvust küllastusest arvestab küllastustegur $k\mu$, mille suurus sünkroonmasinatel on tavaliselt piirides $k\mu = 1{,}10 \ldots 1{,}20$. Takistus x_{aq} küllastusest ei olene.

Turbogeneraatoritel on $k_{ad} = k_{aq} = 1$ ning seega $x_{aq} = x_{ad}$.

Väljendame nüüd ankrureaktsiooni takistused suhteliste suurustena nimivoolu joonkoormuse ehk voolukatte A ja tühijooksul nimipinge puhul õhupilus esineva magnetilise induktsiooni amplituudi B_δ abil.

Nimi-faasipinge on

$$U_n = \pi\sqrt{2} f w k_w \Phi_\delta = \pi\sqrt{2} f w k_w \tau l \frac{2}{\pi} B_\delta \qquad (32\text{-}9)$$

ja voolukate

$$A = \frac{2wmI_n}{2p\tau}, \qquad (32\text{-}10)$$

millest

$$I_n = \frac{p\tau A}{mw}.$$

Nimitakistus

$$x_n = \frac{U_n}{I_n}$$

ehk, asendades U_n ja I_n ülaltoodud avaldistega,

$$x_n = 2\sqrt{2} mfl \frac{w^2 k_w}{p} \frac{B_\delta}{A}. \qquad (32\text{-}11)$$

Jagades x_{ad} ja x_{aq} avaldised takistusega x_n, saame nende takistuste väärtused suhtelistes ühikutes:

$$x^*_{ad} = \frac{\sqrt{2}\,\mu_0}{\pi} \frac{\tau}{k_\delta k_\mu \delta} \frac{A}{B_\delta} k_w k_{ad}, \qquad (32\text{-}12)$$

$$x^*_{aq} = \frac{\sqrt{2}\,\mu_0}{\pi} \frac{\tau}{k_\delta \delta} \frac{A}{B_\delta} k_w k_{aq}. \qquad (32\text{-}13)$$

Mähisetegur k_w, õhupilutegur k_δ, küllastusetegur k_μ ja tegurid k_{ad}, k_{aq} muutuvad kitsastes piirides. Induktsioon B_δ ja voolukate A on määratud materjalide omadustega ning jahutustingimustega. Tulemusena suhtelised ankrureaktsiooni takistused olenevad peamiselt õhupilu δ ja poolusejaotuse τ suhtest. Kuna τ on määratud võimsusega ja pöörlemiskiirusega, siis sõltuvad takistused x_{ad} ja x_{aq} praktiliselt ainult õhupilust.

Võtame arvulise näite. Turbogeneraatoril võimsusega 25000 kW on $\tau = 1{,}54$ m, $\delta = 0{,}03$ m, $B_\delta = 8470$ Gs $= 0{,}847 \frac{\text{Wb}}{\text{m}}$, $A = 536 \frac{\text{A}}{\text{cm}} = 53600 \frac{\text{A}}{\text{m}}$, $k_w = 0{,}924$, $k_\delta = 1{,}15$. Küllastamata ($k_\mu = 1$) x^*_{ad} väärtus on siis

$$x^*_{ad} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7}}{3{,}14} \frac{1{,}54}{1{,}15 \cdot 1 \cdot 0{,}03} \frac{53600}{0{,}847} 0{,}924 = 1{,}47.$$

Ankrureaktsiooni vähendamiseks võetakse sünkroonmasinates õhupilu 2 ... 3 korda suurem kui asünkroonmasinates ning ta muutub tavaliselt piires 1 ... 70 mm. Viimane arv vastab võimsatele turbogeneraatoritele. Tuleb silmas pidada, et liigne õhupilu suurendamine nõuab samaaegset ergutusmähiste tugevdamist, millega kaasub masina hinna tõus.

Ankrureaktsiooni takistuste väärtused suhtelistes ühikutes erinevate sünkroonmasinate tüüpide jaoks on toodud tabelis 32-1. Väiksemad väärtused vastavad suurematele masinatele.

Tabel 32-1

Sünkroonmasinate ankrureaktsiooni takistuste väärtused suhtelistes ühikutes

Nr.	Masinate tüübid	x^*_{ad}	x^*_{aq}
1	Turbogeneraatorid	1,0 ... 2,0	1,0 ... 2,0
2	Hüdrogeneraatorid	0,45 ... 1,40	0,3 ... 0,9
3	Sünkroonmootorid	0,70 ... 1,70	0,5 ... 1,1
4	Sünkroonkompensaatorid	1,4 ... 2,0	0,8 ... 1,2

32-3. ANKRUREAKTSIOONI MAGNETOMOTOORSE JÕU JA ANKRU VOOLU TAANDAMINE ERGUTUSMÄHISELE

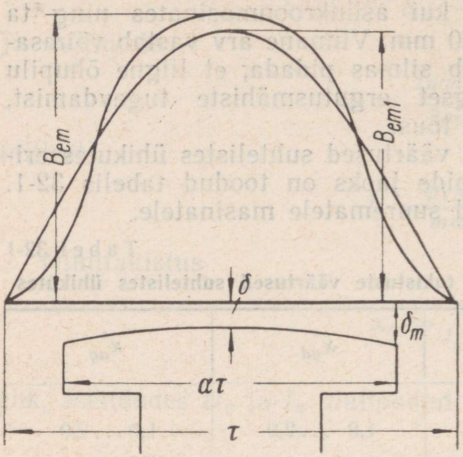
Ergutusmähise magnetvälja tegurid. Praktiliste küsimuste lahendamisel on otstarbekas taandada ankrureaktsiooni iseloomustavad suurused ergutusmähisele, s. o. leida ergutusmähise mmj. või vool, mis õhupilu magnetvälja tekitamise seisukohalt on samaväärne ankrureaktsiooni mmj. või ankru vooluga. Sellist võrdsustamist tuleb teostada magnetväljade põhiharmooniliste suhtes, sest just viimased indutseerivad põhisagedusega emj.

Joonisel 32-8 on esitatud nähtavate poolustega masina ergutusmähise magnetilise induktsiooni kõver *1* maksimaalväärtusega B_{em} ning tema põhiharmooniline *2* amplituudiga B_{em1}. Suhet

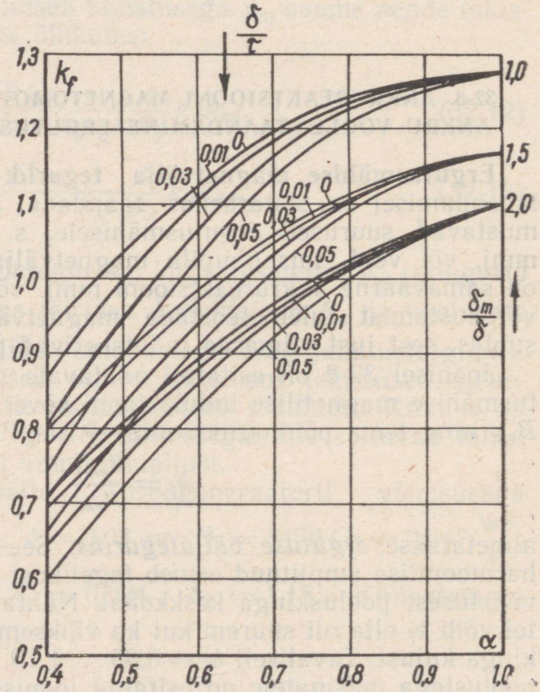
$$k_f = \frac{B_{em1}}{B_{em}} \tag{32-14}$$

nimetatakse *ergutuse väljateguriks*. See näitab, kui palju põhiharmoonilise amplituud erineb tegelikust induktsiooni maksimaalväärtusest pooluskinga keskkohal. Nähtavate poolustega masinatel võib k_f olla nii suurem kui ka väiksem ühest, olenevalt pooluskinga kujust. Tavaliselt $k_f = 0{,}85 \ldots 1{,}15$. Teguri k_f kõverad üksikpoolustega masinatele on esitatud joonisel 32-9.

Nähtamatute poolustega masinatel on ergutusmähis paigutatud uurdeisse (joon. 32-10, *a*). Iga poolusejaotuse ulatuses paik-

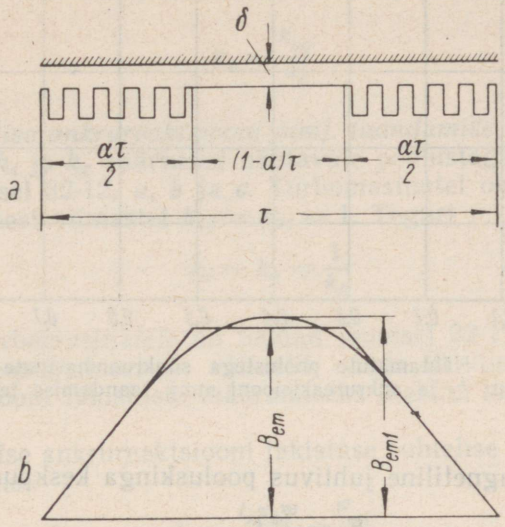


Joon. 32-8. Nähtavate poolustega sünkroonmasina ergutusmagnetväli õhupilus



Joon. 32-9. Nähtavate poolustega masinate ergutuse väljategur k_f

neb mähis teataval osal $\alpha\tau$ kogu poolusejaotusest. Seejuures mähkimata osa $(1-\alpha)\tau$ moodustab nn. suure hamba. Kui mitte arvestada uuretest tingitud õhupilu ebaühtlust, siis ergutusmähis tekitab õhupilus trapetsikujulise magnetilise induktsiooni jaotuse



Joon. 32-10. Nähtamatute poolustega sünkroonmasina ergutusmähise paigutus (*a*) ja ergutusmähise magnetväli õhupilus (*b*)

(joon. 32-10, *b*). Sel puhul saame nähtamatute poolustega masina korral ergutuse väljateguri kohta avaldise

$$k_f = \frac{4}{\pi} \frac{\sin \frac{\alpha\pi}{2}}{\frac{\alpha\pi}{2}}. \qquad (32\text{-}15)$$

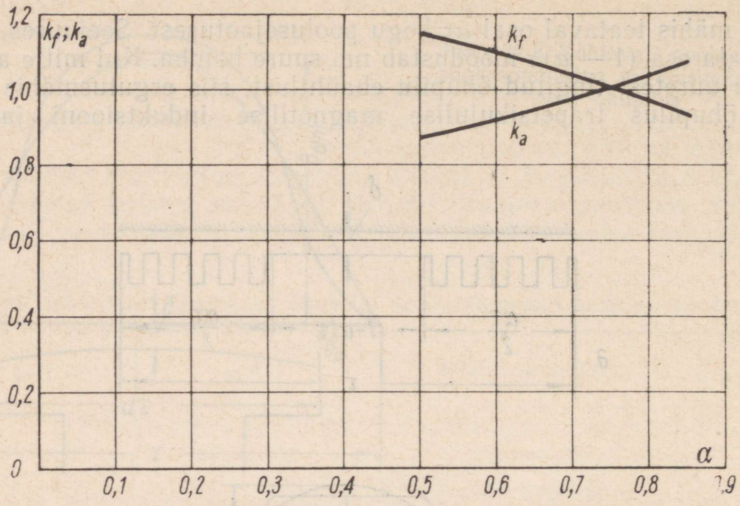
Teguri k_f kõver on esitatud joonisel 32-11. Tavaliselt on $\alpha = 0{,}65 \ldots 0{,}75$.

Ergutusmähise magnetiline induktsioon õhupilus. Ergutusmähis tekitab pooluskinga keskpunkti kohal magnetilise induktsiooni

$$B_{em} = \lambda_\delta F_e, \qquad (32\text{-}16)$$

kus

$$\lambda_\delta = \frac{\mu_0}{k_\delta k_\mu \delta} \qquad (32\text{-}17)$$



Joon. 32-11. Nähtamatute poolustega sünkroonmasinate ergutuse väljategur k_f ja ankrureaktsiooni mmj. taandamise tegur k_a

on õhupilu magnetiline juhtivus pooluskinga keskpunkti kohal ja

$$F_e = \frac{w_e}{2p} I_e \tag{32-18}$$

ergutusmähise mmj. ühe pooluse kohta (w_e — kogu masina ergutusmähise keerdude arv).

Ergutusmähise poolt tekitatava induktsiooni põhiharmoonilise amplituud

$$B_{em1} = \lambda_\delta F_e k_f. \tag{32-19}$$

Ankrureaktsiooni magnetomotoorse jõu taandamine. Pikitelje põhiharmoonilise amplituud õhupilus

$$B_{cdm1} = \lambda_\delta F_{ad} k_{ad}. \tag{32-20}$$

Tähistame ergutusmähisele taandatud pikiteljelise ankrureaktsiooni mmj. F_{ad}'. Viimane on suuruselt võrdne sellise ergutusmähise magnetomotoorse jõuga, mis tekitab samasuguse magnetvälja põhiharmoonilise õhupilus. Seega

$$F_{ad}' k_f = F_{ad} k_{ad},$$

millest

$$F_{ad}' = F_{ad} k_d, \tag{32-21}$$

kus tegur

$$k_d = \frac{k_{ad}}{k_f} \tag{32-22}$$

on *pikiteljelise ankrureaktsiooni mmj. taandamise tegur.*

Põikiteljes ergutusmähist ei ole. Kuid ka põikitelje ankrureaktsiooni mmj. F_{aq} võib taandada ergutusmähisele, s. o. võib leida ekvivalentse ergutusmähise mmj. F'_{aq}, mis loob õhupilus samasuguse magnetvälja põhiharmoonilise. Analoogiliselt leiame, et

$$F'_{aq} = F_{aq} k_q, \tag{32-23}$$

kus

$$k_q = \frac{k_{aq}}{k_f} \tag{32-24}$$

on *põikiteljelise ankrureaktsiooni mmj. taandamise tegur.*

Tegurite k_d ja k_q väärtused nähtavate poolustega masinatel on toodud joonisel 32-12, *a*, *b* ja *c*. Turbomasinatel on tegurid k_d ja k_q võrdsed, sest viimastel $k_{ad} = k_{aq} = 1$. Teguri

$$k_d = k_q = \frac{1}{k_f}$$

väärtused turbomasinatele on toodud joonisel 32-11.

Leitud seoste alusel on võimalik saada ka lihtsad avaldised ankrureaktsiooni takistuste määramiseks masina arvutuslike andmete alusel.

Pikiteljelise ankrureaktsiooni takistuse suhtelise väärtuse jaoks saame avaldise

$$x^*_{ad} = \frac{I_n x_{ad}}{U_n} = \frac{E_{ad}}{U_n},$$

kus E_{ad} on pikiteljeline ankrureaktsiooni emj. juhul, kui $I_d = I_n$. Kuid

$$E_{ad} = cF_a k_{ad},$$

kus c on võrdelisuse tegur ja F_a ankrureaktsiooni mmj. nimivoolu juures, s. o. avaldise (32-3) väärtus juhul, kui $I_d = I_n$. Analoogiliselt

$$U_n = cF_{e0} k_f,$$

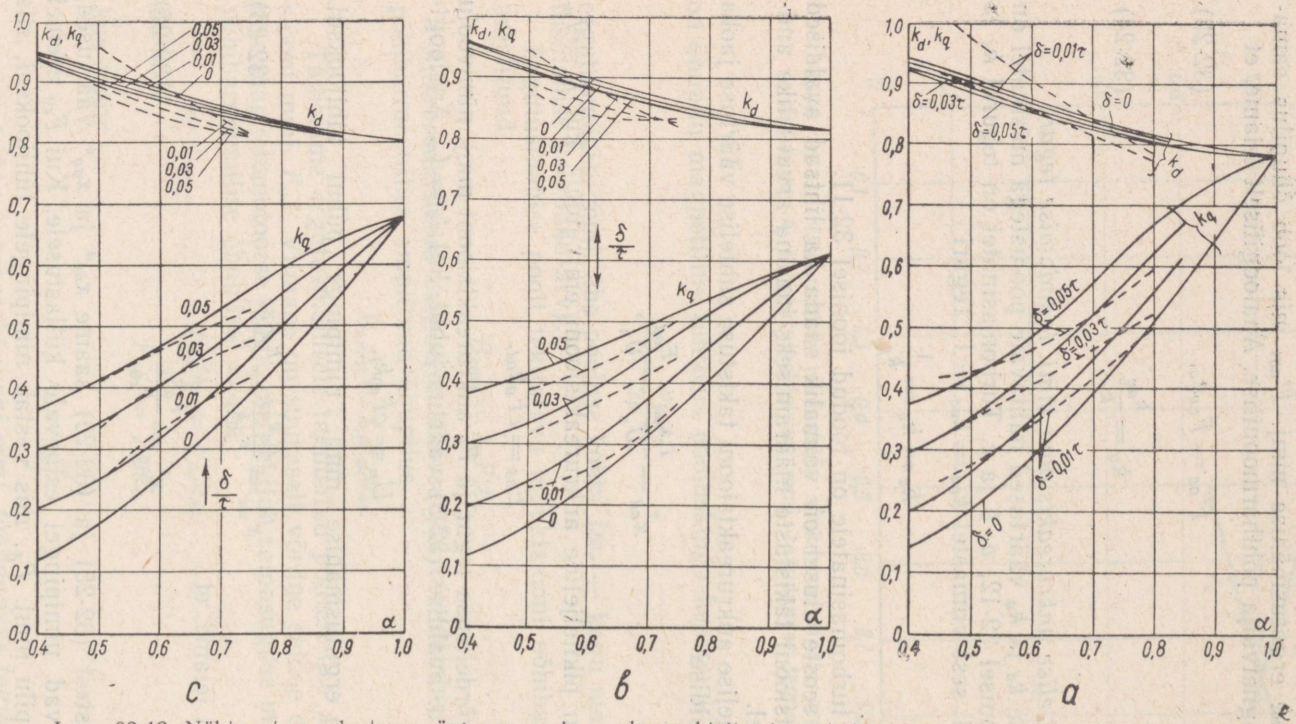
kus F_{e0} on ergutusmähise mmj. nimipinge puhul tühijooksul. Seega

$$x^*_{ad} = \frac{F_a k_{ad}}{F_{e0} k_f} = \frac{F_a k_d}{F_{e0}}. \tag{32-25}$$

Samuti leiame, et

$$x^*_{aq} = \frac{F_a k_q}{F_{e0}}. \tag{32-26}$$

Avaldistest (32-25) ja (32-26) saame $x_{ad}{}^*$ ja $x_{aq}{}^*$ väärtused, mis vastavad nimipingel esinevale küllastusele. Kui F_{e0} asemel võtta õhupilu mmj. F_δ, mis vastab nimipingele tühijooksul, siis



Joon. 32-12. Nähtavate poolustega sünkroonmasina ankrureaktsiooni mmj. taandamise tegurite k_d ja k_q kõverad

$a - \frac{\delta_m}{\delta} = 1{,}0; \quad b - \frac{\delta_m}{\delta} = 1{,}5; \quad c - \frac{\delta_m}{\delta} = 2{,}0$

saame küllastamata x^*_{ad} ja x^*_{aq} väärtused. Kuna F_δ suurus on võrdeline õhupiluga, siis võib ka saadud avaldistest järeldada, et ankrureaktsiooni takistused on pöördvõrdelised õhupilu väärtusega.

Piki- ja põikiteljeliste ankruvoolu komponentide taandamine. Masina magneetimis- ehk tühijooksukõverad määratakse arvutus- või katseandmete põhjal ning nad kujutavad endast ergutusmähise poolt tekitatud magnetvoo Φ põhiharmoonilise või sama mähise poolt ankru mähises indutseeritud emj. E sõltuvust ergutusmähise magnetomotoorsest jõust F_e või ergutusvoolust I_e. Olles taandanud ankrureaktsiooni mmj. ergutusmähisele, võib sarnastest kõveratest otse leida taandatud mmj. F'_{ad} ja F'_{aq} abil ankrureaktsiooni vood Φ_{ad} ja Φ_{aq} või ankrureaktsiooni emj. E_{ad} ja E_{aq}.

Kui nimetatud kõverad on olemas sõltuvalt ergutusmähise magnetomotoorsest jõust F_e, siis on sobiv kasutada taandatud magnetomotoorseid jõude F'_{ad} ja F'_{aq}. On aga need kõverad antud sõltuvalt ergutusvoolust I_e, siis on sobivam kasutada ergutusmähisele taandatud (I'_d, I'_q) piki- ja põikiteljelisi ankruvoolu komponente (I_d, I_q). Määrame nüüd taandatud voolud I'_d ja I'_q, s. o. voolud, mis, esinedes ergutusmähises, tekitaksid samasugused väljade põhiharmoonilised nagu staatori voolu komponendid I_d ja I_q.

Arvestades ühelt poolt seoseid (32-3) ja (32-20) ning teiselt poolt (32-18) ja (32-19), saame:

$$\lambda_\delta \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{wk_w}{p} I_d k_{ad} = \lambda_\delta \frac{w_e}{2p} I'_d k_f .$$

Sellest seosest

$$I'_d = I_d k_{iad}, \tag{32-27}$$

kus

$$k_{iad} = \frac{2\sqrt{2}m}{\pi} \frac{wk_w}{w_e} k_d \tag{32-28}$$

on *pikiteljelise ankruvoolu taandamise tegur.*

Analoogiliselt võib leida taandatud põikiteljelise ankruvoolu komponendi

$$I'_q = I_q k_{iaq}, \tag{32-29}$$

kus

$$k_{iaq} = \frac{2\sqrt{2}m}{\pi} \frac{wk_w}{w_e} k_q \tag{32-30}$$

on *põikiteljelise ankruvoolu taandamise tegur.*

Nähtavate poolustega masinate puhul on $k_{iad} = k_{iaq}$ ning seepärast on tegemist ainult ankru voolu kui terviku taandamisega.

SÜNKROONGENERAATORI VEKTORDIAGRAMMID JA KARAKTERISTIKUD SÜMMEETRILISEL KOORMUSEL

33-1. SÜNKROONGENERAATORI VEKTORDIAGRAMMID

Käesolevas peatükis tutvume lähemalt mitmefaasilise sünkroongeneraatori põhilise töörežiimiga, nimelt püsiva ehk statsionaarse töörežiimiga sümmeetrilise koormuse puhul, kui faasi-, samuti liinipinged ja -voolud moodustavad sümmeetrilise pingete ja voolude süsteemi. Sellisel juhtumil toimuvad kõik protsessid üksikutes faasides samaselt ning piisab ainult ühe faasi vaatlemisest.

Sünkroongeneraatori püsiva sümmeetrilise töörežiimi analüüsimise põhiliseks vahendiks on tema vektordiagramm, mis oma olulisemas osas kujutab graafiliselt väljendatud ankrumähise pinge, elektromotoorsete jõudude ja pingelangude vahelist seost. Vektordiagramm joonestatakse ühe faasi kohta.

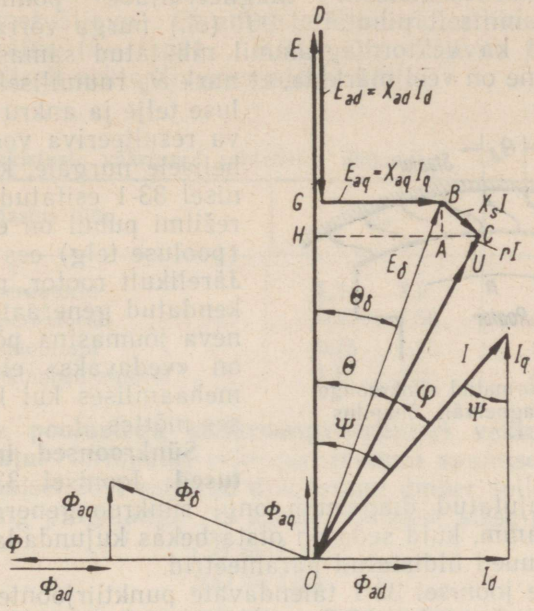
Sünkroonmasinates esinevate protsesside keerulisuse tõttu ei ole nende teooria tekkinud korraga, vaid arenes aastakümnete vältel. Sellega seoses on arenenud ja täiustunud ka sünkroonmasinate vektordiagrammid. Üksikute masinatüüpide jaoks kujunevad nende iseärasustele vastavad diagrammid. Tänapäeval on sünkroonmasinate teooria ja nende vektordiagrammid küllaldasel määral välja kujunenud. Allpool esitatakse sünkroongeneraatorite põhilised vektordiagrammid, analüüsitakse neid ning näidatakse nende peamisi kasutamisviise. Sünkroongeneraatorite vektordiagrammid on aga kergesti kohandatavad ka sünkroonmootoritele.

Põhiliseks sünkroonmasina vektordiagrammiks on allpool vaadeldav nähtavate poolustega sünkroongeneraatori vektordiagramm. Seda nimetatakse ka Blondeli diagrammiks prantsuse teadlase A. Blondeli nime järgi, kes sellele diagrammile pani aluse.

Nähtavate poolustega sünkroongeneraatori vektordiagrammi koostamine. Oletame, et meil on teada ergutusvoolu poolt ankru mähises indutseeritud emj. E, ankru vool I ning nendevaheline sisemine nihkenurk ψ (joon. 33-1). Voolu I, mis joonisel 33-1 on võetud induktiivse iseloomuga, jaotame komponentideks I_d ja I_q, vastavalt risti ja rööbiti E-ga. Ankrureaktsiooni voogude vektorid Φ_{ad} ja Φ_{aq} on suunatud voolude I_d ja I_q sihis. Nende voogude poolt ankru mähises indutseeritud elektromotoorsed jõud

$$E_{ad} = I_d x_{ad}, \quad E_{aq} = I_q x_{aq}$$

jäävad vastavatest voogudest ja vooludest 90° võrra maha (joon. 33-1).



Joon. 33-1. Nähtavate poolustega sünkroongeneraatori vektordiagrammi konstrueerimine

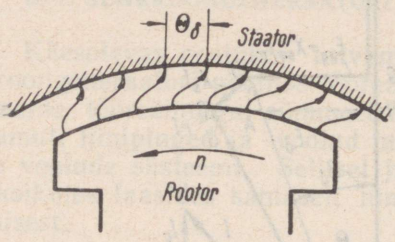
Liites elektromotoorsed jõud E, E_{ad} ja E_{aq}, leiame emj. E_δ, mis on indutseeritud õhupilu resulteeriva magnetvoo Φ_δ poolt. On võimalik välja joonestada ka vastav voo Φ_δ vektor, arvestades, et pooluste voog Φ ennetab emj. E 90° võrra (joon. 33-1) ning resulteeriv voog Φ_δ on pooluste voo Φ ja ankruvoogude Φ_{ad}, Φ_{aq} summa. Põhimagnetahela (pooluste ike, poolused, ankur) küllastusaste, seega ka pikiteljelise ankrureaktsiooni takistuse x_{ad} suurus on määratud voo Φ_δ või emj. E_δ suurusega. Tavaliselt magnetvoogude vektoreid diagrammil ei näidata.

Lahutades emj. vektorist E_δ pingelangud ankru mähise puiste- ja aktiivtakistustes Ix_s ja Ir, leiame generaatori klemmipinge vektori U.

Joonisel 33-1 on näidatud pingevektor U, pinge ja voolu vaheline nihkenurk φ, emj. E ja pinge U vaheline nurk Θ, mida nimetatakse koormuse nurgaks, ning emj. E ja E_δ vaheline nurk Θ_δ, mida võib nimetada sisemiseks koormuse nurgaks. Nagu selgub allpool (p. 36-2, 36-3), olenevad nurgad Θ ja Θ_δ masina aktiivkoormusest (võimsusest), millest nende nimetused tulenevadki.

Joonisel 33-1 näidatud nihkenurgad on loomulikult ajalised, kuid nendele vastavad ka sama suured ruumilised nihkenurgad, mõõdetuna seejuures elektrilistes kraadides. Nii on piki- ja põiki-

teljeliste ankrureaktsiooni magnetväljade põhiharmoonilised masinas ruumiliselt nihutatud 90° (el.) nurga võrra, samal ajal aga on nad ka vektordiagrammil nihutatud samasuguse nurga võrra. Oluline on veel märkida, et nurk Θ_δ ruumiliselt vastab pooluse telje ja ankru pinnal esineva resulteeriva voo Φ_δ telje vahelisele nurgale, kusjuures joonisel 33-1 esitatud generaatorirežiimi puhul on emj. vektor E (pooluse telg) ees (joon. 33-2). Järelikult rootor, millele on rakendatud generaatorit tööle paneva jõumasina pöördemoment, on «vedavaks» elemendiks nii mehaanilises kui ka magnetilises mõttes.



Joon. 33-2. Koormatud sünkroongeneraatori magnetväli õhupilus

Sünkroonsed induktiivtakistused. Joonisel 33-1 jämedate joontega kujutatud diagramm ongi sünkroongeneraatori täielik vektordiagramm, kuid seda on otstarbekas kujundada veel ümber, tuues sisse uued üldistatud parameetrid.

Vaatleme joonisel 33-1 täiendavate punktiirjoonte abil saadud täisnurkset kolmnurka ABC, milles nurk C on võrdne ψ-ga, sest nurkade vastavad haarad on risti. Kolmnurgast ABC saame:

$$AC = Ix_s \cos\psi = I_q x_s, \quad AB = Ix_s \sin\psi = I_d x_s$$

ning

$$DH = DG + GH = I_d x_{ad} + I_d x_s = I_d x_d,$$
$$HC = HA + AC = I_q x_{aq} + I_q x_s = I_q x_q,$$

kus

$$x_d = x_{ad} + x_s,$$
$$x_q = x_{aq} + x_s \qquad (33\text{-}1)$$

on uued sünkroonmasina induktiivtakistused, mida nimetatakse vastavalt *piki-* ja *põikiteljelisteks sünkroonseteks takistusteks*.

Takistused x_d ja x_q on sünkroonmasina püsivrežiimide põhilised parameetrid ning sisuliselt on nad ankru mähise täielikud induktiivtakistused piki- ja põikiteljelistele vooludele I_d ja I_q. Takistuste x_d ja x_q põhilisteks komponentideks on ankrureaktsiooni takistused x_{ad} ja x_{aq}, kuna puistetakistus x_s, mis arvestab uurete, lauposade ja õhupilu (tingituna ankru mähise mmj. kõrgematest harmoonilistest) puistevoogusid, on võrdlemisi väike (suhtelistes ühikutes $x_s^* = 0{,}07 \ldots 0{,}13$). Nähtavate poolustega masinatel on $x_q < x_d$, nähtamatute poolustega masinatel aga ühtlase õhupilu tõttu $x_q = x_d$.

Tabelis 33-1 on toodud sünkroonsete takistuste tavalised väärtused mitmesuguste sünkroonmasinate tüüpide kohta. Termin «sünkroonsed takistused» tuleneb sellest, et need takistused keh-

tivad sünkroonsete režiimide puhul (rootor pöörleb sünkroonselt staatori magnetväljaga). Et ankru mähise aktiivtakistus on tavaliselt üsna väike ($r = 0{,}001 \ldots 0{,}03$), siis aktiivne pingelang Ir jäetakse tavaliselt vektordiagrammidest välja.

Tabel 33-1

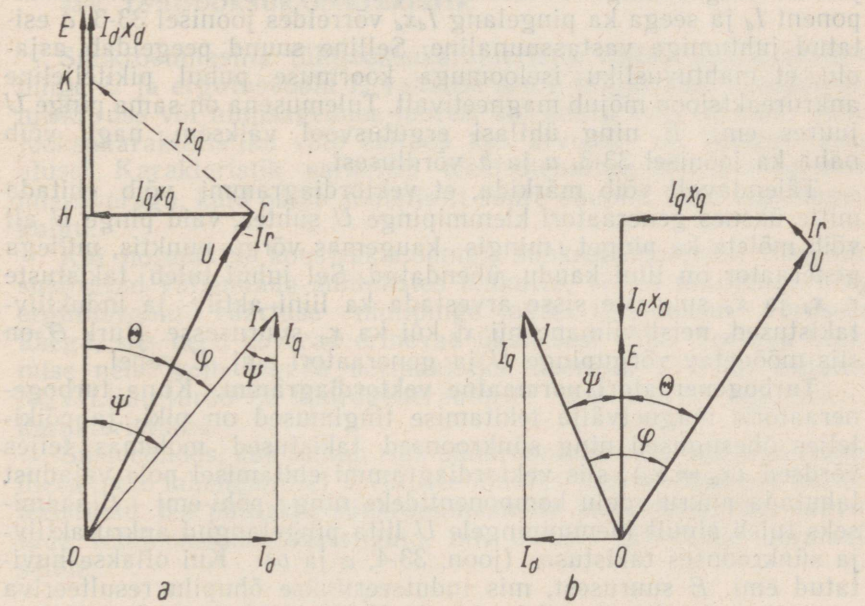
Sünkroonsete takistuste väärtused suhtelistes ühikutes

Masina tüüp	x_d^*	x_q^*
Turbogeneraatorid	1,2 ... 2,2	1,2 ... 2,2
Hüdrogeneraatorid	0,50 ... 1,50	0,35 ... 1,0
Sünkroonmootorid	0,75 ... 1,85	0,55 ... 1,25
Sünkroonkompensaatorid	1,5 ... 2,2	0,9 ... 1,4

Nähtavate poolustega sünkroongeneraatori vektordiagrammi normaalne kuju. Normaalse vektordiagrammi saamiseks kujundatakse osa joonisel 33-1 esitatud diagrammi ümber selliselt, et emj. E_{ad} ja E_{aq} ning pingelangu Ix_s asemel tuuakse sisse pingelangud

$$CH = I_q x_q,$$
$$HD = I_d x_d.$$

Tulemusena saame joonisel 33-3, *a* esitatud nähtavate poolustega



Joon. 33-3. Nähtavate poolustega sünkroongeneraatori vektordiagramm induktiivse (*a*) ja mahtuvusliku (*b*) iseloomuga koormuse puhul

sünkroongeneraatori vektordiagrammi normaalsel kujul induktiivse iseloomuga koormuse juhtumil.

Saadud vektordiagrammi üks olulisemaid iseärasusi seisab selles, et kui punktist C (joon. 33-3, *a*) risti vooluvektoriga I kanda lõik $CK = Ix_q$ (vastab vektorile $CK = Ix_q$), siis viimase otspunkt K satub ergutusmähise poolt indutseeritud emj. vektorile E või selle jätkule. Viimane asjaolu on tingitud sellest, et täisnurkses kolmnurgas HKC kehtib seos

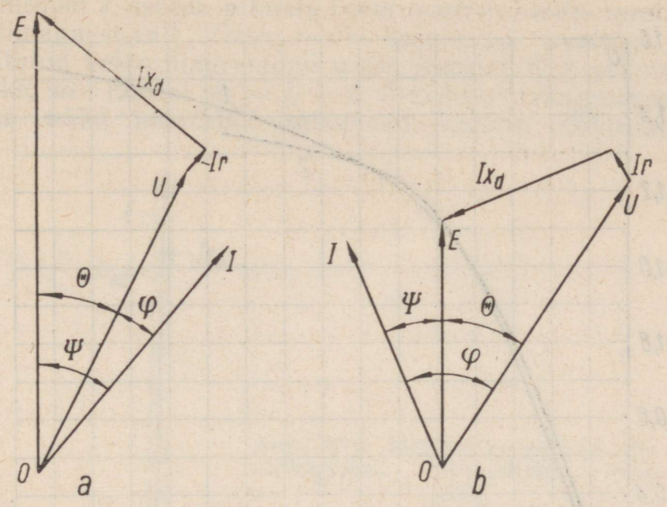
$$KC = \frac{HC}{\cos\psi} = \frac{I_q x_q}{\cos\psi} = \frac{I\cos\psi\, x_q}{\cos\psi} = Ix_q.$$

Mainitud iseärasust kasutatakse vektordiagrammi ehitamisel, kui on antud U, I, nendevaheline nurk φ ja masina parameetrid (takistused). Sellises olukorras vektori E suurus ja, mis on veel olulisem, tema suund pole teada. Seda on aga võimalik kindlaks teha, ehitades punktist C pingelangu Ix_q vektori vastavalt äsjaselgitatud vektordiagrammi omadusele. Pärast seda on võimalik lahutada I komponentideks I_d ja I_q, leida pingelangud $I_q x_q$ ja $I_d x_d$ ning E.

Joonisel 33-3, *b* on esitatud nähtavate poolustega sünkroonmasina vektordiagramm mahtuvusliku iseloomuga koormuse puhul. Selle konstrueerimine toimub täiesti analoogiliselt eelmise joonise diagrammiga. Joonisel 33-3, *b* on voolu pikiteljeline komponent I_d ja seega ka pingelang $I_d x_d$ võrreldes joonisel 33-3, *a* esitatud juhtumiga vastassuunaline. Selline suund peegeldab asjaolu, et mahtuvusliku iseloomuga koormuse puhul pikiteljeline ankrureaktsioon mõjub magneetivalt. Tulemusena on sama pinge U juures emj. E ning ühtlasi ergutusvool väiksem, nagu võib näha ka joonisel 33-3, *a* ja *b* võrdlusest.

Täiendavalt võib märkida, et vektordiagrammi võib ehitada mitte üksnes generaatori klemmipinge U suhtes, vaid pinge U all võib mõista ka pinget mingis kaugemas võrgu punktis, millega generaator on liini kaudu ühendatud. Sel juhul tuleb takistuste r, x_d ja x_q suuruste sisse arvestada ka liini aktiiv- ja induktiivtakistused, neist viimane nii x_d kui ka x_q suurusesse. Nurk Θ on siis mõõdetav võrgupinge U ja generaatori emj. E vahel.

Turbogeneraatori normaalne vektordiagramm. Kuna turbogeneraatoris magnetvälja tekitamise tingimused on piki- ja põikiteljes ühesugused ning sünkroonsed takistused mõlemas teljes võrdsed ($x_q = x_d$), siis vektordiagrammi ehitamisel pole vajadust lahutada ankru voolu komponentideks ning põhi-emj. E saamiseks tuleb ainult klemmipingele U liita pingelangud ankru aktiiv- ja sünkroonses takistuses (joon. 33-4, *a* ja *b*). Kui ollakse huvitatud emj. E suurusest, mis indutseeritakse õhupilu resulteeriva magnetvoo poolt, siis tuleb pingele U liita pingelangud aktiiv- ja puistetakistuses. Tavaliselt võib pingelangu Ir kui suhteliselt üsna väikese suuruse diagrammist välja jätta.



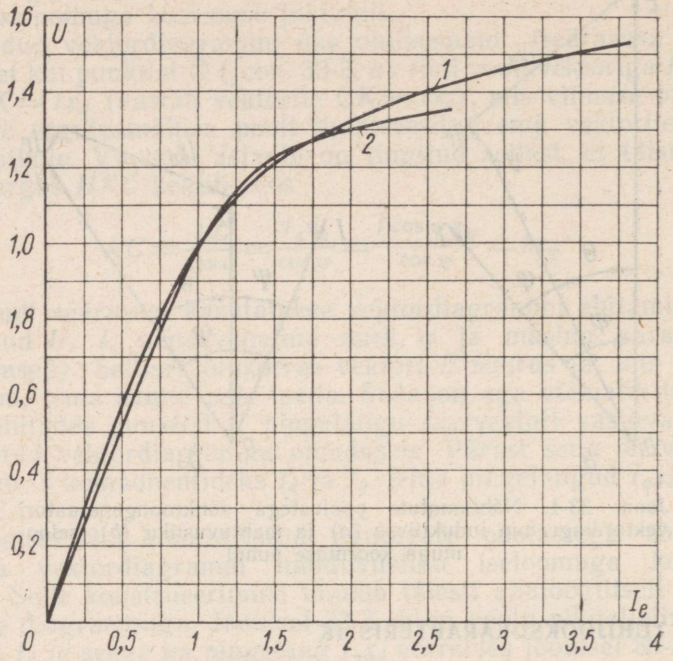
Joon. 33-4. Nähtamatute poolustega sünkroongeneraatori vektordiagramm induktiivse (*a*) ja mahtuvusliku (*b*) iseloomuga koormuse puhul

33-2. TÜHIJOOKSUKARAKTERISTIK

Sünkroonmasina tühijooksukarakteristik esitab ankru mähise pinge U ja ergutusvoolu I_e vahelise seose tühijooksul nimipöörlemiskiiruse või nimisageduse juures, kui ankru vool on null. Tühijooksukarakteristiku võib ehitada kas arvutus- või katseandmete alusel. Karakteristik sarnaneb elektrotehnilise terase magneetimiskõveraga, kuid omab suhteliselt suure õhupilu tõttu lamedamat kulgu.

Kui normaalse konstruktsiooniga sünkroonmasinate tühijooksukõverad väljendada suhtelistes ühikutes, võttes nimipinge ning ergutusvoolu väärtuse nimipinge juures tühijooksul võrdseks ühega, siis need kõverad erinevad üksteisest vähe. Teatava keskmise neist võib lugeda normaalseks. Joonisel 33-5 on esitatud NSV Liidu turbo- ja hüdrogeneraatorite normaalsed tühijooksukarakteristikud.

Süsteemides, kus töötab rida sünkroonmasinaid, võetakse tüüpülesannete lahendamisel arvutuste aluseks just normaalsed karakteristikud. Ka püütakse sünkroonmasinate projekteerimisel saavutada tühijooksukarakteristikuid, mis oleksid lähedased normaalsetele.



Joon. 33-5. Turbogeneraatori (*1*) ja hüdrogeneraatori (*2*) normaalsed tühijooksukarakteristikud

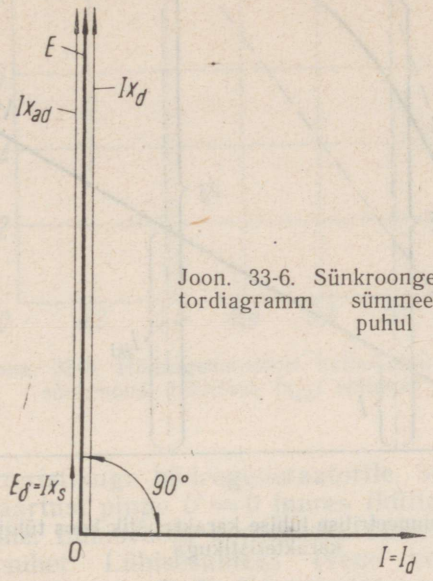
33-3. LÜHISEKARAKTERISTIK JA LÜHISESUHE

Lühisekarakteristik. Lühisekarakteristiku ülesvõtmiseks lühistatakse ankru klemmid ampermeetri või voolutrafoga, pannakse masin pöörlema nimikiirusega, antakse ergutusmähisesse vool ja määratakse rea ergutusvoolu väärtuste juures ankru mähise lühisvoolud. Antud juhul vaatleme nn. sümmeetrilise lühise karakteristikut, mille puhul on lühistatud omavahel kõik ankruklemmid. Seejuures mähise üksikute faaside lühisvoolud on samuti sümmeetrilised ning tekitavad sünkroonselt rootoriga pöörleva ankrureaktsiooni magnetvälja. Ühtlasi eeldame, et on tegemist ainult püsiva lühise režiimiga.

Kuna lühise puhul ankruahelas esinevad ainult ankru mähise enda takistused, kusjuures aktiivtakistus on võrreldes induktiivtakistustega väga väike, siis lühisvool on praktiliselt puhtinduktiivne ning jääb põhiliselt elektromotoorsest jõust E maha 90° võrra. Seega $\psi = 90°$ ja

$$I_a = I \cos \psi = 0,$$
$$I_d = I \sin \psi = I$$

ning lühisvool I osutub pikiteljeliseks vooluks, mille mmj. tegutseb lahtimagneetivalt. Võttes $r \approx 0$, kujunevad joonistel 33-3 ja 33-4 esitatud vektordiagrammid nüüd joonisel 33-6 esitatud diagrammiks, sest lühisel on ka $U = 0$. Resulteeriv magnetvoog õhupilus on nüüd määratud suhteliselt väikese elektromotoorse



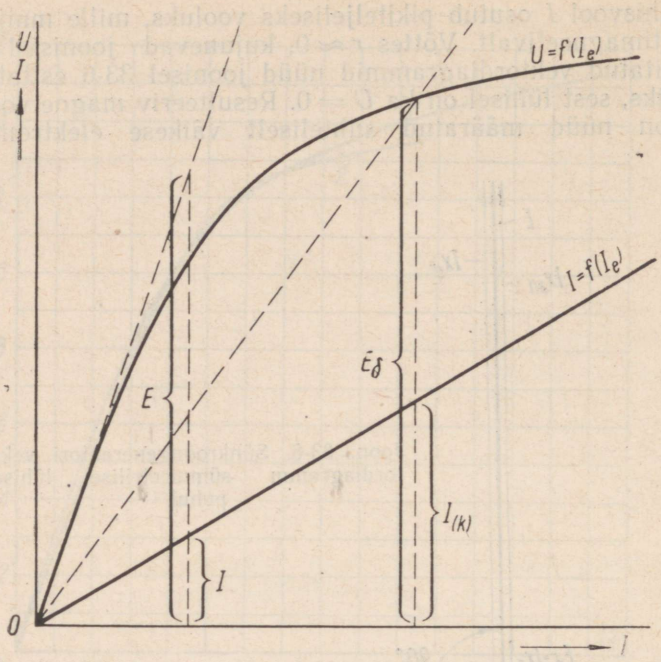
Joon. 33-6. Sünkroongeneraatori vektordiagramm sümmeetrilise lühise puhul

jõuga E_δ, mis on vajalik pingelangu katmiseks puistetakistusel x_s. Seega lühisel jääb magnetvoog väikeseks ning magnetahel on küllastamata, mistõttu ka lühisvoolu I sõltuvus ergutusvoolust on sirgjooneline (joon. 33-7).

Pikiteljelise sünkroonse takistuse määramine tühijooksu- ja lühisekarakteristiku abil. Lühise vektordiagrammist (joon. 33-6) selgub, et

$$x_d = \frac{E}{I},$$

kus I on lühisvool mingi ergutusvoolu väärtuse juures ja E sellele egutusvoolule vastav põhi-emj. Kuna lühisel on masin küllastamata ning tuleb kasutada küllastamata x_d väärtust, siis ka E väärtus tuleb võtta sirgestatud tühijooksukarakteristikult (joon. 33-7), mis on tegelikule tühijooksukarakteristikule puutujaks tema alguspunktis. Seega saab tühijooksu- ja lühisekarakteristiku abil määrata küllastamata x_d väärtust. Määratud karakteristikute alusel on aga võimalik määrata ka küllastatud x_d väärtusi, mis vastavad teatavatele sisemiste resulteerivate magnetvoogude



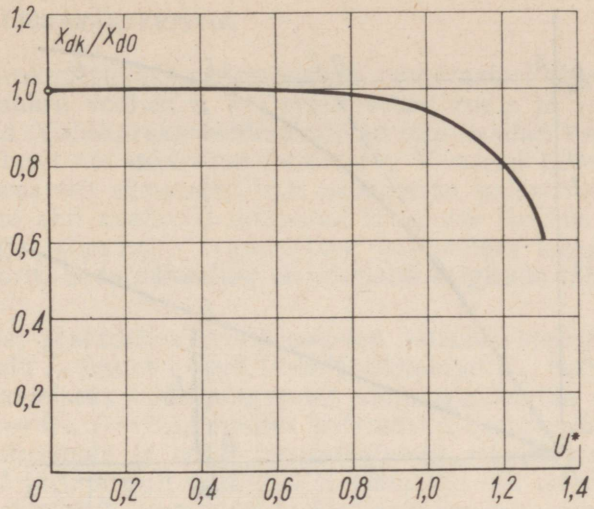
Joon. 33-7. Sümmeetrilise lühise karakteristik koos tühijooksukarakteristikuga

poolt indutseeritud emj. E_δ väärtustele. Selleks tuleb võtta tühijooksukarakteristikul (joon. 33-7) punkt $U = E_\delta$ ning määrata lühisvoolu I_k väärtus, mis vastab lühisekarakteristikul samale ergutusvoolule kui E_δ väärtus tühijooksukarakteristikul. Tulemusena saame:

$$x_{dk} = \frac{E_\delta}{I_{(k)}} = \frac{U}{I_{(k)}}.$$

Säärane määramisviis põhineb sellel, et antud E_δ väärtusele vastava muutumatu küllastuse astme puhul kujutaks tühijooksukarakteristik sirgjoont, mis läbib tegeliku tühijooksukarakteristiku punkti $U = E_\delta$ (joonisel 33-7 punktiirjoon).

Kuna x_s on suhteliselt väike, siis ka tööreŽiimides ligikaudselt $E_\delta \approx U$ ja enamikel juhtudel võib piisava täpsusega lugeda, et x_d väärtus oleneb masina klemmipingest. Seda sõltuvust on ülaltoodu alusel võimalik kergesti kindlaks teha, kui masina tühijooksu- ja lühisekarakteristikud on teada. Joonisel 33-8 on esitatud x_{dk}/x_{d0} sõltuvus suhtelisest klemmipingest $\frac{U}{U_n}$ normaalse tühi-



Joon. 33-8. Hüdrogeneraatori küllastatud pikiteljelise sünkroonse takistuse (x_{dk}) sõltuvus pingest

jooksukarakteristikuga hüdrogeneraatorile. Seejuures tuleb x_{d0} all mõista x_d väärtust pinge $U = 0$ juures (küllastamata x_d väärtus).

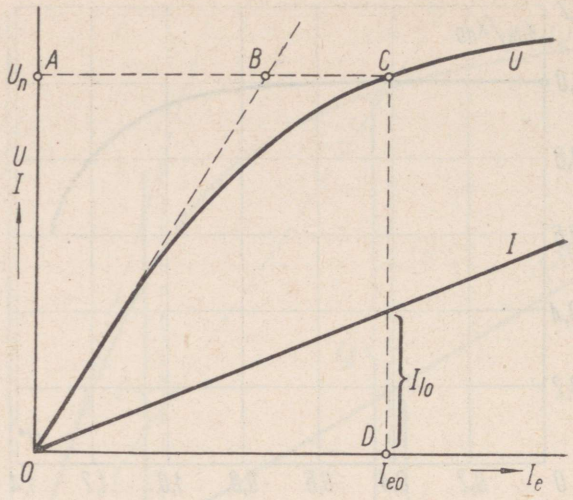
Lühisesuhe. Lühisvoolu kordsuseks nimetatakse lühisvoolu ja nimivoolu suhet. Lühisesuhteks (vene keeles — отношение короткого замыкания, O. K. З.) nimetatakse ГОСТ 183-45 kohaselt lühisvoolu kordsust, mis esineb tühijooksu ergutusvoolu I_{e0} korral, s. o. sellise ergutusvoolu juures, mis tühijooksul annab klemmidel nimipinge. Seejuures eeldatakse, et tegemist on sümmeetrilise püsiva lühisega ning et vastavad katsed on teostatud nimipöörlemiskiiruse juures. Lühisesuhe iseloomustab põhiliselt masina ankrureaktsiooni tugevust ning tema väärtused tuuakse ära kataloogides.

Joonisel 33-9 on näidatud tühijooksu- ja lühisekarakteristikud, kus I_{l0} on tühijooksu-ergutusvoolu puhul esinev lühisvool. Ülaltoodud definitsiooni alusel lühisesuhe

$$k_l = \frac{I_{l0}}{I_n}.$$

Varem selgitatu alusel on joonise 33-9 abil võimalik veenduda, et voolu I_{l0} võib arvutada nimipinge U_n ja sellele pingele vastava küllastatud pikiteljelise sünkroonse takistuse väärtuse $x_{d(kn)}$ abil järgmiselt:

$$I_{l0} = \frac{U_n}{x_{d(kn)}}.$$



Joon. 33-9. Lühisesuhte definitsiooni selgitamiseks

Seega

$$k_l = \frac{U_n}{x_{d\,(kn)} I_n},$$

kust selgub, et lühisesuhe võrdub suhtelistes ühikutes väljendatuna küllastatud pikiteljelise sünkroonse takistuse pöördväärtusega

$$k_l = \frac{1}{x^*_{d(kn)}}. \qquad (33\text{-}2)$$

Lühisesuhet võib väljendada ka küllastamata pikiteljelise sünkroonse takistuse väärtuse x_d^* ning küllastusteguri (vt. joon. 33-9)

$$k_\mu = \frac{AC}{AB}$$

abil ja nimelt järgmiselt:

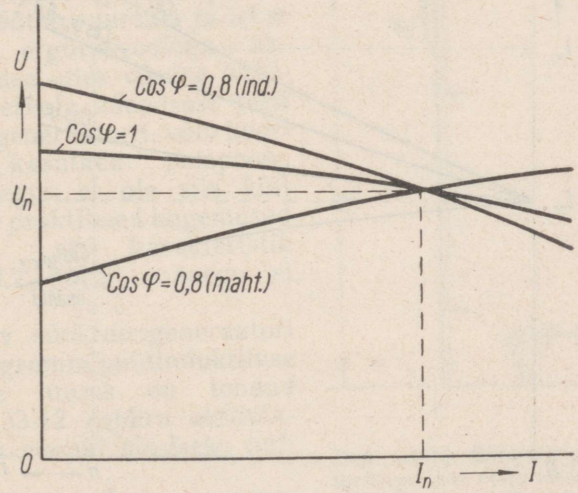
$$k_l = \frac{k_\mu}{x^*_d}. \qquad (33\text{-}3)$$

Lühisesuhte väärtus on turbogeneraatoritel piirides 0,45 ... 1,0 ja hüdrogeneraatoritel 0,65 ... 2,0. Muide näitavad need arvud, et sünkroonmasinate püsivad lühisevoolud ei ole eriti suured. See on seletatav ankrureaktsiooni tugeva lahtimagneetiva mõjuga. Mida suurem on lühisesuhe, seda väiksem on ankrureaktsiooni mõju masinas. Teiselt poolt on lühisesuhe seda suurem, mida suurem on masina õhupilu.

Väliskarakteristikuks nimetatakse generaatori klemmipinge sõltuvust ankru voolust I, kui ergutusvool, $\cos\varphi$ ja sagedus on konstantsed. Väliskarakteristikud võivad olla saadud kas arvutusandmete alusel või määratud katseliselt. Viimasel juhul koormatakse generaatorit sümmeetriliselt reostaatide, paispoolide ja kondensaatorite abil vastavalt etteantud koormuse iseloomule. Koormus on aga hõlpsamini reguleeritav, kui selleks kasutada sünkroonmootorit. Seda võimalust on võimalik selgitada lähemalt allpool.

Suurimat praktilist tähtsust omavad väliskarakteristikud, millel nimivoolu I_n juures esineb täpselt nimipinge U_n. Sellise karakteristiku saamiseks tuleb kõigepealt välja reguleerida just nimirežiim ($U = U_n$, $I = I_n$), muutes koormust ja ergutusvoolu. Edasi, jättes ergutusvoolu ja $\cos\varphi$ muutumatuteks, vähendatakse koormusvoolu I järk-järgult nullini. Kui võimalik, siis on otstarbekas mõõta karakteristik ka nimivoolu ületavate voolude puhul.

Niiviisi saadud väliskarakteristikute näiteid on esitatud joonisel 33-10. Induktiivse iseloomuga koormuse puhul pinge koormusvoolu vähenedes märksa tõuseb, mis on seletatav ankrureaktsiooni mõju vähenemisega, sest antud juhul see on lahtimagneetiva toimega. Mahtuvusliku iseloomuga koormuse puhul koormusvoolu vähenedes pinge aga langeb, sest magneetiva iseloomuga ankrureaktsiooni mõju väheneb. Suuremate voolude puhul on karakteristikute kulg järsem, sest vaatamata tingimusele $\cos\varphi =$



Joon. 33-10. Sünkroongeneraatori väliskarakteristikud

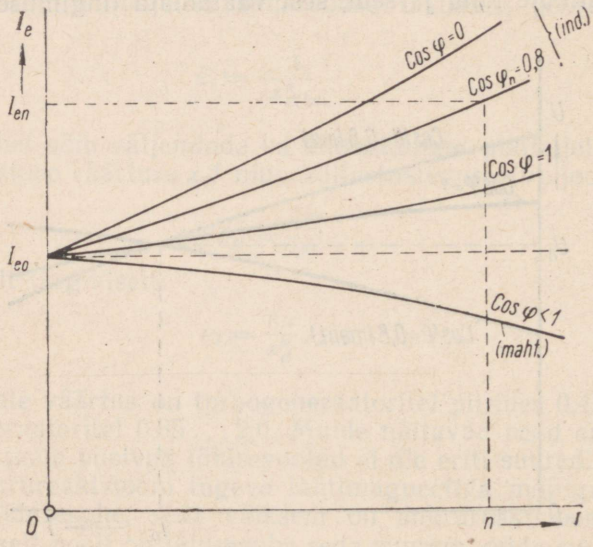
$=$ const, on siis sisemine nihkenurk ψ suurem (vt. näiteks joon. 33-3 ja 33-4).

Sünkroongeneraatori pingemuutuseks ΔU nimetatakse pinge tõusmist ($\Delta U > 0$) või langemist ($\Delta U < 0$), kui nimirežiimis (U_n, I_n, $\cos \varphi_n$, f_n) töötaval generaatoril koormus muutub nulliks, ergutusvool ja sagedus aga jäävad muutumatuteks. Pingemuutus ΔU on määratav väliskarakteristiku abil (joon. 33-10). Tavaliselt väljendatakse seda protsentides nimipingest ($\Delta U_{\%}$).

Standardsed sünkroongeneraatorid on ette nähtud töötamiseks induktiivse iseloomuga koormusel, sest tarbijate seas on ülekaalus asünkroonmootorid, mis tarbivad induktiivset voolu. Tavaliselt on sünkroongeneraatorite nimivõimsustegur $\cos \varphi_n = 0{,}8$ (ind.). Selliste generaatorite pingemuutus moodustab keskmiselt $\Delta U_{\%} = 25 \ldots 40\%$.

33-5. REGULEERIMISKARAKTERISTIK

Reguleerimiskarakteristikuks nimetatakse ergutusvoolu I_e sõltuvust ankru voolust I, $I_e = f(I)$, kusjuures $U = \text{const}$, $f = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$. Seega reguleerimiskarakteristik näitab, kuidas on vaja reguleerida ergutusvoolu I_e, et säiliks konstantne pinge muutuva koormuse korral. Suurimat praktilist tähtsust omavad nimipingele vastavad reguleerimiskarakteristikud (joon. 33-11).



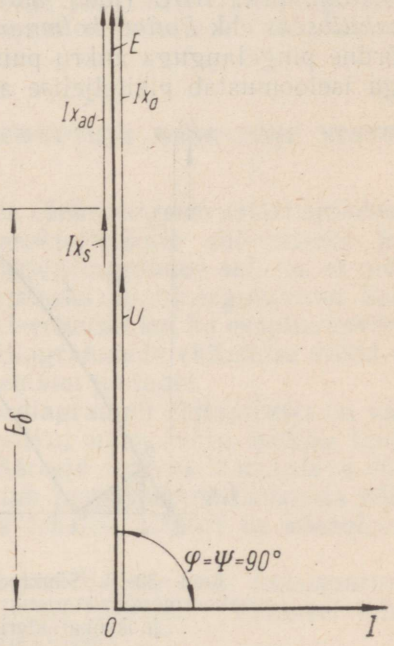
Joon. 33-11. Sünkroongeneraatori reguleerimiskarakteristikud

Induktiivse iseloomuga koormuse puhul on reguleerimiskarakteristik tõusev, sest suureneva lahtimagneetiva ankrureaktsiooni kompenseerimiseks on vaja suurendada ergutusvoolu. Ka aktiivse koormuse puhul on karakteristik tõusev, sest sisemiste induktiivtakistuste mõjul on sisemine nihkenurk $\psi > 0$, nagu see selgub vektordiagrammide analüüsimisel (vt. näit. joon. 33-3 ja 33-4). Mahtuvusliku iseloomuga koormuse puhul on reguleerimiskarakteristik langev.

Normaalsete sünkroongeneraatorite puhul ($\cos \varphi_n = 0{,}8$, ind.) tuleb üleminekul tühijooksult ($U = U_n$) nimikoormusele tõsta ergutusvoolu ligikaudu kahekordseks, s. o. nimiergutusvool on umbes kaks korda suurem tühijooksu ergutusvoolust.

33-6. KOORMUSKARAKTERISTIK

Induktiivkoormuskarakteristik. Koormuskarakteristik kujutab sünkroonmasina pinge U sõltuvust ergutusvoolust I_e, kui ankru vool I, võimsustegur $\cos \varphi$ ja sagedus f jäävad muutumatuteks. Suurimat praktilist tähtsust omab nn. induktiivkoormuskarakteristik, mis vastab puhtinduktiivsele koormusele ($\cos \varphi = 0$) ja määratakse tavaliselt nimivoolu juures. Praktiliselt saab niisugust karakteristikut üles võtta, kui koormata katsetatavat sünkroongeneraatorit teise sünkroongeneraatoriga, kusjuures esimene töötab suurema ja teine väiksema ergutusvooluga, aktiivvõimsuse olles võrdne nulliga. Kui ei ole käepärast teist sünkroongeneraatorit, võib koormuseks kasutada paispoole. Võimsustegur ei ole siis küll null, kuid praktilised kogemused näitavad, et karakteristik $\cos \varphi \approx 0{,}2$ puhul peaaegu ei muutu.



Joon. 33-12. Sünkroongeneraatori vektordiagramm puhtinduktiivse koormuse korral

Vastav sünkroongeneraatori vektordiagramm puhtinduktiivse koormuse juures on toodud joonisel 33-12 (ankru aktiivtakistus on võetud võrdseks nulliga).

Joonisel 33-13 on esitatud

tühijooksukarakteristik *2* ($I = 0$) ning induktiivkoormuskarakteristik *1* ($I = I_n$). Viimane kulgeb lahtimagneetiva ankrureaktsiooni tõttu madalamalt. Punkt *A* vastab lühisele ($U = 0$) nimivoolu juures.

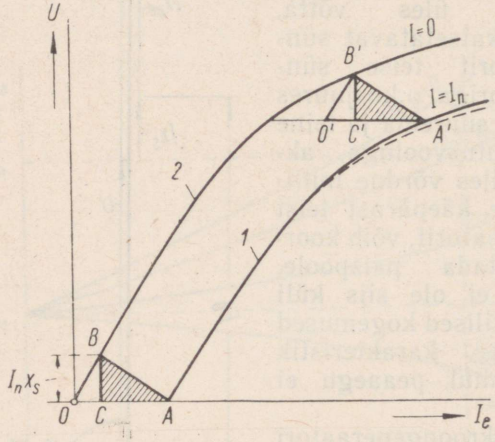
Ankru mähise puistetakistuse määramine. Nimivoolu puhul esineb puistetakistuses pingelang $I_n x_s$. Kandes selle suuruse joonisel 33-13 tühijooksukarakteristikule, saame abstsissteljel punkti *C*, mis jagab lühisel esineva ergutusvoolu *OA* kaheks osaks — *OC* ja *CA*. Esimene vastab ergutusvoolu komponendile, mis on vajalik pingelangu $I_n x_s$ tasakaalustava emj. E_n indutseerimiseks. Teine osa *CA* iseloomustab antud režiimis esinevat pikiteljelist ankrureaktsiooni ning võrdub ergutusmähisele taandatud ankru nimivooluga

$$I_a' = I_n k_{iad},$$

kus k_{iad} väärtus on antud valemiga (32-28). Kui joonise 33-13 abstsissteljele oleks kantud mitte ergutusvoolu, vaid ergutusmähise mmj. väärtused, siis lõik *DA* võrduks ergutusmähisele taandatud ankru mmj. väärtusega:

$$F_a' = F_a k_d = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{wk_w}{p} I_n k_d.$$

Kolmnurka *ABC* (joon. 33-13) nimetatakse *sünkroonmasina reaktiivseks* ehk *Potier' kolmnurgaks*. Selle vertikaalne kaatet on võrdne pingelanguga ankru puistetakistuses, horisontaalne kaatet aga iseloomustab pikiteljelise ankrureaktsiooni suurust.



Joon. 33-13. Sünkroongeneraatori induktiivkoormuskarakteristik (kõver *1*) koos tühijooksukarakteristikuga (kõver *2*)

Potier' kolmnurga kaatetid induktiivkoormuskarakteristiku ülesvõtmisel põhimõtteliselt ei muutu. Seega, kui nihutada teda joonisel

33-13 paralleelselt iseendaga edasi nii, et punkt B libiseks piki tühijooksukarakteristikut, peab punkt A liuglema induktiivkoormuskarakteristikul. Üks võimalikest Potier' kolmnurga asenditest on näidatud joonisel 33-13 (kolmnurk $A'B'C'$).

Seda asjaolu on võimalik kasutada katselisel teel saadud tühijooksu- ja induktiivkoormuskarakteristikute abil x_s leidmiseks. Selleks valime induktiivkoormuskarakteristikul mingi punkti A' (joon. 33-13), kanname sellest punktist vasakule lõigu $O'A' = OA$ ning tõmbame joone $O'B'$ paralleelselt tühijooksukarakteristiku algosaga OB kuni lõikumiseni punktis B' tühijooksukarakteristikuga. Nüüd ehitame ristjoone $B'C'$, mille pikkus on võrdeline pingelanguga puistetakistuses $I_n x_s$ ning selle kaudu leiamegi x_s.

Tuleb märkida, et kirjeldatud x_s määramise viis pole eriti täpne. Põhjus seisab selles, et koormuskarakteristiku punktis A' (joon. 33-13) on ergutusvool suurem kui tühijooksukarakteristiku punktis B'. Seepärast on suurem ka ergutusmähise puistevoog, mille tõttu koormuse olukorras on pooluste südamikud rohkem küllastatud kui tühijooksul. Vastavalt vajab masin sama magnetvoo saamiseks koormusel ka suuremat ergutusvoolu ning punkt A' nihkub paremale. Seetõttu nihkub paremale ka koormuskarakteristiku kõver, nagu see on näidatud joonisel 33-13 punktiirjoonega. Tulemusena on katseandmetest määratav takistus 15...30% võrra tegelikust puistetakistusest x_s suurem. Seepärast nimetatakse seda *Potier' induktiivtakistuseks* (x_p).

33-7. ERGUTUSVOOLU JA PINGEMUUTUSE MÄÄRAMINE VEKTORDIAGRAMMIDE ABIL

Vektordiagramme võib kasutada sünkroongeneraatori omaduste kindlaksmääramiseks, näiteks karakteristikute ehitamiseks jne. Kõige sagedamini rakendatakse vektordiagramme selleks, et määrata antud koormusrežiimi saavutamiseks vajalik ergutusvool. Seda on vaja nii sünkroonmasina projekteerimisel kui ka ekspluateerimisel. Seejuures kasutatavad vektordiagrammide ehitamise viisid on aga rakendatavad ka teistel, üldisematel juhtudel.

Teatud režiimile vastava vektordiagrammi ehitamiseks on vaja teada masina tühijooksukarakteristikut ning ankru mähise takistusi r, x_s, x_d, x_q või muid samaväärseid suurusi. Tänapäeva sünkroonmasinate teooriat iseloomustab just tendents kasutada kõikjal mainitud parameetreid. Seda tehakse allpool ka käesolevas raamatus.

Üldreeglina joonestatakse vektordiagrammid faasisuuruste jaoks kas füüsikalistes või suhtelistes ühikutes. Viimasel juhul kujuneb vektordiagramm ülevaatlikumaks.

Nähtavate poolustega sünkroongeneraatori vektordiagrammi ehitamine. Antud pinge U, voolu I ja võimsusteguri $\cos\varphi$ (või nurga φ) järgi saab joonestada pinge ja voolu vektorid (joon.

33-3). Liidame pingele U pingelangu Ir paralleelselt vooluvektoriga ja Ix_q sellega risti (ennetavalt). Saadud punkti K ja alguspunkti O ühendame joonega OK, mis määrab põhi-emj. E suuna. Edasi tõmbame punktist C (joon. 33-3) joone CH risti joonega OK ning lahutame voolu I komponentideks I_d ja I_q. Nüüd kanname punktist H emj. E suunas pingelangu $I_d x_d = HD$. Seejuures lõik OD on võrdne ergutusvoolu poolt indutseeritud põhi-elektromotoorse jõuga E.

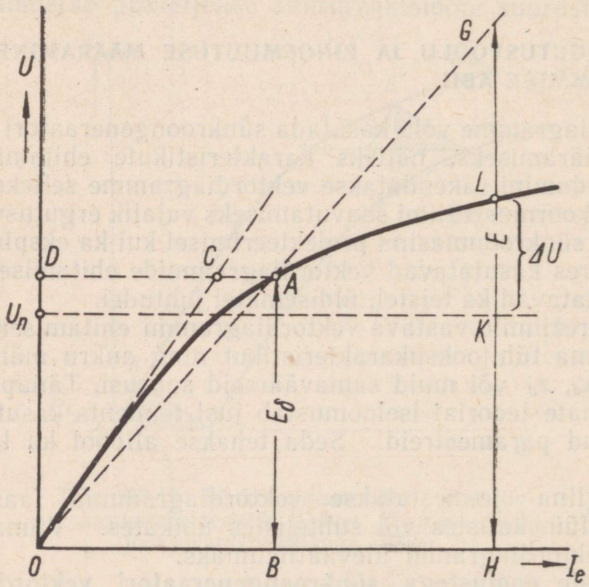
Sellega on vektordiagrammi ehitamine põhimõtteliselt lõpetatud. Jääb ainult selgitada, kuidas on võimalik leida antud töörežiimi küllastusastmele vastav x_d väärtus, sest kataloogides ja masinate passides tavaliselt tuuakse küllastamata x_{d0} väärtused.

Selleks kanname punktist C (joon. 33-3) pingelangu Ix_q suunas pingelangu Ix_s. Seega leiame (vt. joon. 33-1) õhupilu resulteerivale magnetväljale vastava emj. E_δ, mis määrabki küllastusastme. Kanname nüüd tühijooksukarakteristikule (joon. 33-14) punkti A nii, et $AB = E_\delta$. Siis küllastustegur

$$k_\mu = \frac{DA}{DC}$$

ning küllastatud x_{dk} väärtus

$$x_{dk} = \frac{x_{d0}}{k_\mu} = \frac{DC}{DA} x_{d0}.$$



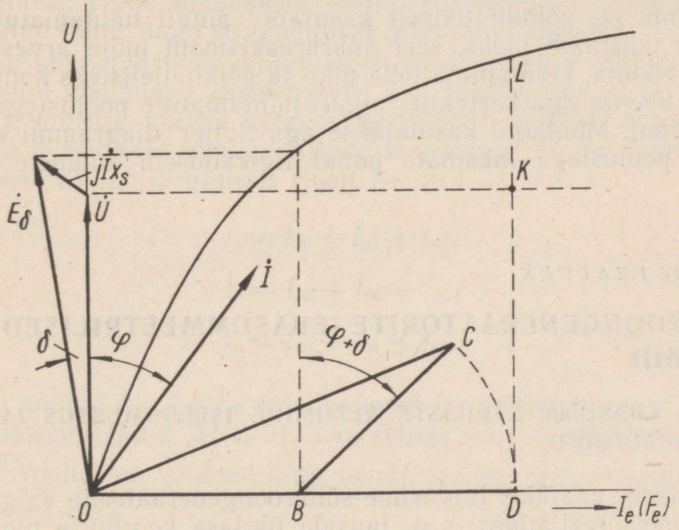
Joon. 33-14. Sünkroongeneraatori nimiergutusvoolu ja pingemuutuse määramine

Vektordiagrammi (joon. 33-3) ehitamisel tuleb kasutada küllastatud x_{dk} väärtust. Kui x_s suurus pole teada, võib punkti A joonisel 33-14 määrata nii, et $AB = U$. Siis saame mõnevõrra suurema x_{dk} väärtuse, mis E ja ergutusvoolu määramisel tekitab vea, tavaliselt kuni 5 . . . 8%.

Kui E on määratud, võime leida talle vastava ergutusvoolu. Selleks tõmbame tühijooksukarakteristikul (joon. 33-14) sirge OAG läbi punkti A, mis vastab varem leitud resulteerivale elektromotoorsele jõule E_δ. Saadud joon vastab sirgestatud tühijooksukarakteristikule antud režiimil esineva küllastusastme puhul. Leides sellel sirgjoonel punkti G, mis vastab vektordiagrammist leitud emj. E väärtusele, leiame abstsisstelje selle indutseerimiseks vajaliku ergutusvoolu $I_e = OH$. Kui nii teostatud konstruktsioonid vastavad nimirežiimile, siis on OH nimiergutusvool ning lõik LK (joon. 33-14) nimirežiimile vastav pingemuutus ΔU.

Nähtamatute poolustega sünkroongeneraatori vektordiagrammi ehitamine. Turbogeneraatori vektordiagrammi võime ehitada analoogiliselt eelmises alapunktis käsitletule. Seejuures diagrammi ehitus mõnevõrra lihtsustub, sest olles leidnud E_δ ja määranud küllastatud $x_d = x_q$ väärtuse, võime punktist C (joon. 33-4) kohe kanda risti vooluvektoriga pingelangu Ix_d, mille tulemusena saamegi emj. E.

Turbogeneraatorite puhul kasutatakse laialdaselt ka *Potier' vektordiagrammi,* mis annab samad tulemused. Potier' vektordia-



Joon. 33-15. Nimiergutusvoolu ja pingemuutuse määramine Potier' diagrammi alusel

grammi ehitamiseks vajame tühijooksukarakteristikut ning ankrureaktsiooni mmj. ja puistetakistuse x_s väärtusi. Ankru mähise aktiivtakistust võib mitte arvestada. Tavaliselt joonestatakse vektordiagramm tühijooksukarakteristiku juurde. Selleks kanname pingevektori U tühijooksukarakteristiku ordinaattelje suunas (joon. 33-15) koordinaatteljestiku alguspunktist. Samast punktist nurga φ all pingevektori suhtes suuname vooluvektori I ja liidame pingele U pingelangu Ix_s, saades emj. E_δ. Viimase suuruse kanname üle ordinaatteljele ning edasi tühijooksukarakteristikule (punkt A). Punkt B määrab E_δ indutseerimiseks vajaliku mmj. või ergutusvoolu. Et leida vajalik summaarne mmj., tuleb viimatisaadule veel geomeetriliselt lisada komponent BC, mis on vajalik ankrureaktsiooni kompenseerimiseks. Kuna E_δ ja I on omavahel nihutatud nurga $\varphi + \delta$ võrra, siis ka BC tuleb suunata sama nurga all vertikaaltelje suhtes. Kui abstsissteljele on kantud ergutusmähise mmj. F_e väärtused, siis lõik BC tuleb võtta võrdseks ergutusmähisele taandatud ankrureaktsiooni mmj. suurusega. On aga abstsissteljele kantud ergutusvoolu väärtused, tuleb lõik BC võtta võrdseks ergutusmähisele taandatud ankruvoolu suurusega (vt. p. 33-2).

Ergutusvoolu või ergutuse mmj. väärtuseks osutub lõik OC või ülekantuna abstissteljele lõik OD. Lõik LK on võrdne pingemuutusega ΔU.

Potier' diagramm koosneb pingete diagrammist (U, Ix_s, E) koos ankru voolu vektoriga I ja mmj. diagrammist OCB. See diagramm on põhimõtteliselt kasutatav ainult nähtamatute poolustega masinate jaoks, sest ankrureaktsiooni mõju arvestatakse siin tervikuna, lahutamata teda piki- ja põikiteljelisteks komponentideks. See on aga korrektne ainult nähtamatute poolustega masinate puhul. Mõnikord kasutatakse aga Potier' diagrammi ka nähtavate poolustega masinate puhul ligikaudsete andmete saamiseks.

XXXIV PEATÜKK

SÜNKROONGENERAATORITE EBASÜMMEETRILISED TÖÖREŽIIMID

34-1. EBASÜMMEETRILISTE REŽIIMIDE ISELOOMUSTUS JA UURIMISMEETODID

Eelmises peatükis tutvusime sünkroongeneraatorite tööga sümmeetrilistes režiimides, s. o. faaside ühtlase koormuse olukorras. Praktikas esinevad sageli ka ebasümmeetrilised režiimid, mille puhul faasid on koormatud ebaühtlaselt. Ebaühtlane faaside koor-

mus võib tekkida näiteks juhul, kui sünkroongeneraatorite poolt toidetavasse võrku on lülitatud võimsad ühefaasilised tarbijad (elektriraudteede alajaamad jne.). Veel sagedamini, kuigi lühiajaliselt, tekivad ebaühtlased voolud generaatori faasides mittesümmeetriliste lühiste puhul võrgus, milledeks on: 1) lühis liini- ja nulljuhtme vahel ehk nn. *ühefaasiline lühis;* 2) lühis kahe liinijuhtme vahel ehk nn. *kahefaasiline lühis* ja 3) lühis kahe liinijuhtme ning nulljuhtme vahel — nn. *kahefaasiline lühis koos nulljuhtmega.* Nulljuhtme osa kõrgepingevõrkudes täidab enamasti maa, sest sellistes võrkudes nullpunktid sageli maandatakse. Ka kolmefaasilised ehk sümmeetrilised lühised saavad harilikult alguse mingist ebasümmeetrilisest lühisest. Kuigi ebasümmeetrilised lühised esinevad lühiajaliselt, sest vigastatud võrkude osad lülitatakse automaatselt tegutsevate kaitseseadmete abil välja, avaldavad nad siiski võrgu ja generaatorite tööle suurt mõju. Lühistega kaasuvad üldiselt ka tugevad siirdeprotsessid. Käesolevas peatükis me siirdeprotsesse lähemalt ei analüüsi ning ebasümmeetriliste režiimide iseärasuste selgitamisel oletame, et tegemist on statsionaarsete ehk püsivrežiimidega.

Ebasümmeetriliste nähtuste uurimise üldiseks vahendiks elektriahelates on sümmeetriliste komponentide meetod. Teatavasti kolmefaasilise süsteemi mittesümmeetrilise koormuse puhul on võimalik lahutada kõigi kolme faasi voole või pingeid kolmeks komponendiks nii, et vastavad komponendid igast faasist moodustavad kolm sümmeetrilist süsteemi. Seda meetodit rakendame ka sünkroongeneraatori ebasümmeetrilise režiimi uurimiseks. Seejuures oletame, et kolmefaasilise sünkroongeneraatori mähised on ühendatud tähte, nagu see enamikul juhtumitel esinebki.

Olgu kolmefaasilise sünkroongeneraatori ankru mähise faasid koormatud vooludega ebaühtlaselt, s. o. faasivoolud I_a, I_b, I_c pole nii oma suuruse kui ka nihkenurga poolest üksteise suhtes ühesugused. Kasutades sümmeetriliste komponentide meetodit, lahutame need voolud järgmiselt (joon. 34-1):

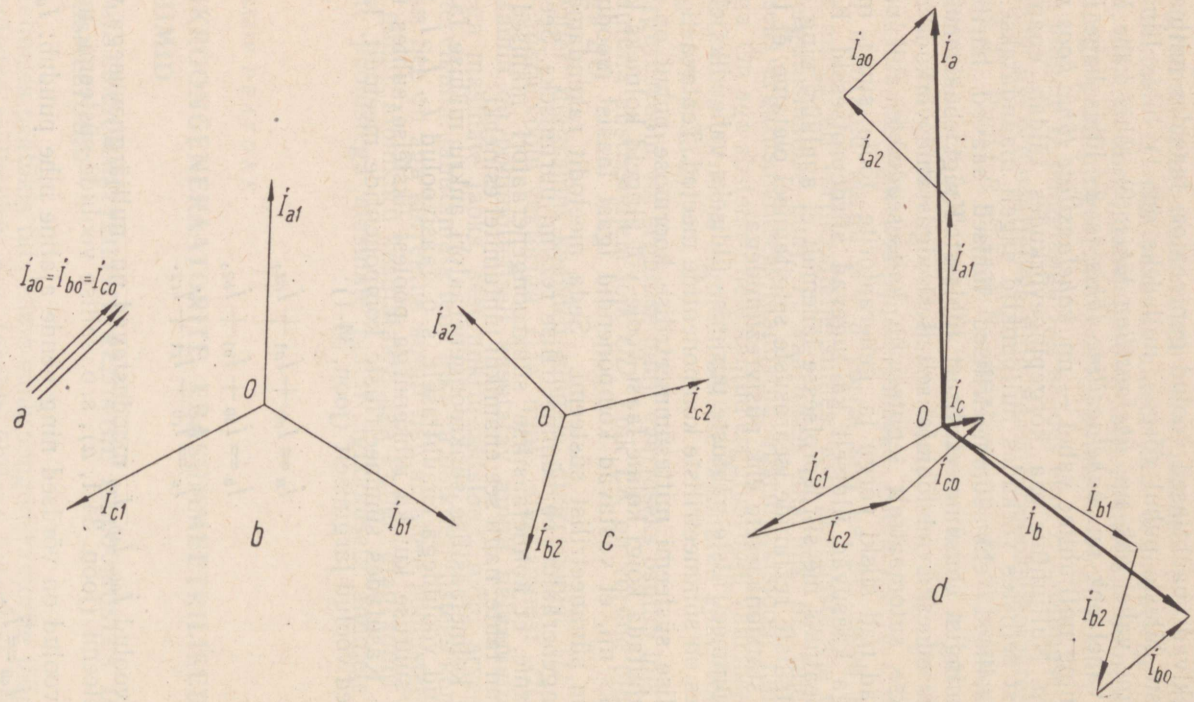
$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2},$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2},$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{c0} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2}.$$

Siin voolud $\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{b0}$, $\dot{I}_{c0}$ moodustavad nn. nulljärgnevusega voolude süsteemi (joon. 34-1, *a*), s. o. sellise voolude süsteemi, millel faaside voolud on võrdsed ning nende ajaline nihe puudub: $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0} = \dot{I}_0$.

Nulljärgnevusega voolud, olles kõikides faasides igal hetkel võrdsed ja samasuunalised, saavad esineda ainult siis, kui on ole-



Joon. 34-1. Kolmefaasilise voolusüsteemi sümmetrilised komponendid:
a — null-, *b* — päri- ja *c* — vastujärgnevuskomponendid; *d* — summaarsed faaside voolud

mas nulljuhe või kui nullpunkt on maandatud, sest ainult säärasel korral saab tekkida kinnine vooluahel nulljärgnevusvooludele (ahel kujuneb nulljuhtme või maa kaudu). Vool nulljuhtmes või maas on siis kolmekordne nulljärgnevusvool ($3\dot{I}_0$).

Voolud $\dot{I}_{a1}$, $\dot{I}_{b1}$, $\dot{I}_{c1}$ moodustavad pärijärgnevusvoolude süsteemi (joon. 34-1, *b*). Seejuures on need voolud suuruselt võrdsed, kuid nihutatud üksteise suhtes 120° võrra. Generaatori normaalsetel, sümmeetrilistel töörežiimidel esinevad mähistes ainult pärijärgnevus-süsteemi voolud.

Voolud $\dot{I}_{a2}$, $\dot{I}_{b2}$, $\dot{I}_{c2}$ moodustavad vastujärgnevusvoolude süsteemi (joon. 34-1, *c*). Need voolud on samuti omavahel võrdsed ning nihutatud üksteisest 120° võrra, kuid faaside järjekord on pärijärgnevusvooludele vastupidine.

Tegelikud faaside voolud on erisüsteemiliste voolude summaks (joon. 34-1, *d*). Tuleb silmas pidada seda, et mõningail juhtudel ühe või kahe faasi voolud võivad olla võrdsed nulliga. Sellele vaatamata, kasutades sümmeetriliste komponentide meetodit, esinevad nendes faasides ikkagi üksikutele sümmeetrilistele komponentidele vastavad voolud, mis aga summana vastavates faasides annavad nulli.

Analoogiliselt jaotatakse sümmeetrilisteks komponentideks ka faasipinged. Ergutusmähise vool indutseerib ankru mähises loomulikult ainult pärijärgnevusega elektromotoorse jõu.

Eri süsteemide voolud kutsuvad masinas esile erineva iseloomuga protsessid, mistõttu on kohane uurida iga voolusüsteemi eraldi.

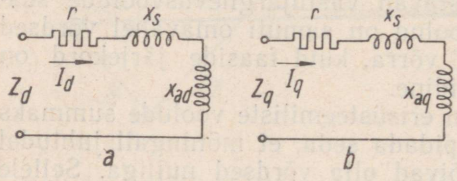
34-2. SÜMMEETRILISTE VOOLUKOMPONENTIDE TOIME JA NENDELE VASTAVAD ELEKTRILISED TAKISTUSED SÜNKROONMASINATES

Pärijärgnevusvoolud ja -takistused. Eelmistes peatükkides vaadeldud sünkroongeneraatorite omadused kehtisid sümmeetrilisel koormusel, teiste sõnadega pärijärgnevusvoolude puhul, ja sellega on pärijärgnevusvoolude toime, samuti sünkroonmasina omadused sel puhul juba selgitatud. Sünkroonmasina takistusteks pärijärgnevusvooludele on ankru mähise aktiivtakistus r ja piki- ning põikiteljelised sünkroonsed takistused x_d ja x_q. Lühisel võib arvestada ainult induktiivtakistustega, seepärast esineb ainult pikiteljeline vool ning pärijärgnevustakistuseks püsiva lühise režiimis on pikiteljeline sünkroontakistus x_d.

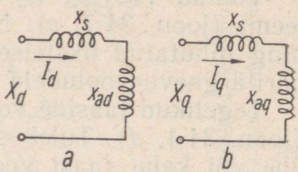
Pärijärgnevusvoolude suhtes on sünkroonmasinates olulisimaks asjaolu, et ankruvoolud tekitavad ankrureaktsiooni magnetvoo, mis pöörleb rootoriga sünkroonselt ning seega statsionaarsete režiimide puhul ei indutseerita rootori (induktori) mähistes

elektromotoorseid jõude. Tulemusena ankru mähis nagu ei olekski seotud rootori mähistega vastastikuse induktiivsuse kaudu.

Sünkroonmasina aseskeemid pärijärgnevusvooludele omavad joonistel 34-2, *a* (pikiteljes) ja 34-2, *b* (põikiteljes) esitatud kuju. Pikiteljeliseks näivtakistuseks on Z_d ja põikiteljeliseks näivtakistuseks Z_q. Takistus x_s arvestab puistevoo, takistustused x_{ad}, x_{aq} aga ankrureaktsioonivoo toimet. Enamasti aktiivtakistust võib mitte arvestada ning tulemusena skeemid lihtsustuvad (joon. 34-3).



Joon. 34-2. Sünkroonmasina aseskeemid pärijärgnevusvooludele statsionaarses režiimis ($r \neq 0$): *a* — pikiteljes, *b* — põikiteljes



Joon. 34-3. Sünkroonmasina aseskeemid pärijärgnevusvooludele statsionaarses režiimis ($r = 0$): *a* — pikiteljes, *b* — põikiteljes

Vastujärgnevusvoolud ja -takistused. Vastujärgnevusvoolud tekitavad ka pöörleva magnetvälja, mille kiirus on samasugune nagu pärijärgnevusvoolude magnetväljalgi, kuid see väli pöörleb vastassuunas, sest faaside järjestus on vastupidine. Seega vastujärgnevusvoolude poolt tekitatud magnetvoog ehk lühidalt vastujärgnevusvoog pöörleb rootori suhtes kahekordse kiirusega ning indutseerib rootori mähistes kahekordse sagedusega elektromotoorsed jõud ja voolud. Järelikult vastujärgnevusvoolude suhtes on sünkroonmasina staatori ja rootori mähised seotud vastuinduktiivselt nagu transformaatori või asünkroonmasina primaar- ja sekundaarmähised. Vastujärgnevusvoolude suhtes kujutab sünkroonmasin endast tegelikult asünkroonmasinat, mis töötab libistusega $s = 2$, s. o. vastulülituse režiimis.

Puhtal kujul vastujärgnevusvooludega režiimi võime sünkroonmasinas saada siis, kui ergutamata kolmefaasilise sünkroonmasina lülitame kolmefaasilisse võrku ning paneme tema rootori jõumasina abil pöörlema ankru mähise pöördväljale vastassuunas sünkroonsele vastava kiirusega. Suurte voolude vältimiseks tuleb niisugust katset teha madaldatud pingel (10 ... 20% nimipingest). Sellise katse eesmärgiks on vastujärgnevusvoolude puhul esinevate takistuste, s. o. vastujärgnevustakistuste määramine.

Sünkroonmasina tegelikes töörežiimides on ergutusmähise ahel suletud ergutusvoolu allika kaudu, tavaliselt läbi ergutusmasina ankru mähise. Viimase takistus on sünkroonmasina ergutusmähi-

sega võrreldes äärmiselt väike ning vastujärgnevusvoolude toime suhtes võib ergutusmähist vaadelda nagu lühistatut. Seepärast tuleb ka ülalmainitud katse tegemisel ergutusmähis lühistada.

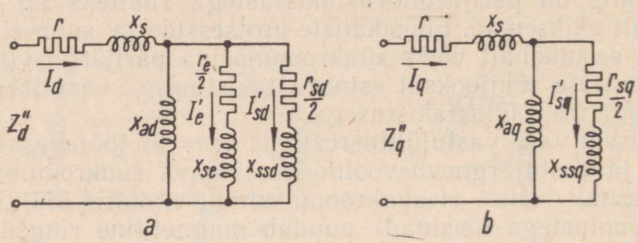
Ankru mähise vastujärgnevusvoog indutseerib ergutus- ja ka summutusmähises, kui viimane on olemas, voole, mis omakorda tekitavad magnetvooge. Viimased, nagu ikka vahelduvvooluahelate puhul, mõjuvad primaarset voogu vähendavalt. Seega ankru mähise poolt osutatavad takistused vastujärgnevusvooludele vähenevad ning on pärijärgnevustakistustega (näiteks x_d) võrreldes tunduvalt väiksemad. Füüsikaliste protsesside ja suuruslike vahekordade seisukohalt võiks sünkroonmasina pärijärgnevustakistusi võrrelda trafo tühijooksul esineva takistusega, vastujärgnevustakistusi aga trafo lühistakistusega.

Olulisem vahe vastulülitusrežiimis ($s = 2$) töötava asünkroonmasina ja vastujärgnevusvooludega töötava sünkroonmasina vahel on ainult selles, et sünkroonmasinate rootoril üldjuhul (nähtavate poolustega masinad) puudub magnetiline ringsümmeetria ning igal juhul puudub elektriline sümmeetria, kuna ergutusmähis aheldub ainult pikiteljes tegutsevate voogudega, samuti ainult need vood indutseerivad ergutusmähises voole. Seepärast võib ergutusmähist nimetada pikiteljeliseks mähiseks. Ka summutusmähis ei oma päris täielikku ringsümmeetriat, sest tema vardad asetsevad ainult pooliskingades. Ankru mähise vastujärgnevusvoog rootori suhtes liigub ning seda vaheldumisi pikiteljest põikitelge ja vastupidi. Ülaltoodud põhjustel selle voo mõju mõlemates telgedes ei avaldu ühesuguselt. Seepärast tuleb olukorda mõlemas teljes vaadelda eraldi. Analoogiliselt sellega, kuidas ühte pulseerivat välja võib lahutada kaheks vastassuunaks pöörlevaks väljaks (vt. p. 23-3, 23-4), võib ka rootori suhtes pöörlevat ankru vastujärgnevusvälja lahutada kaheks rootori suhtes seisvaks, kuid pulseerivaks magnetväljaks, kusjuures üks nendest toimib pikiteljes, olles aheldatud ergutus- ja summutusmähisega, teine aga põikiteljes, olles aheldatud ainult summutusmähisega. Seega võib kujutleda, nagu oleks vastujärgnevusvoolude suhtes sünkroonmasinas tegemist kahe transformaatoriga, milledest üks vastab protsessidele pikiteljes, teine aga põikiteljes. Seepärast on ka vaja vastujärgnevusvoolude puhul kasutusele võtta kaks sünkroonmasina aseskeemi.

Joonisel 34-4, *a* on toodud aseskeem vastujärgnevusrežiimi puhul pikiteljes esinevate protsesside kohta, mis meenutab kaksikuuretega asünkroonmasina aseskeemi. Ankru aktiiv- ja puistetakistus (r, x_s) on primaarahelas. Magneetimisahela takistuseks on pikiteljeline ankrureaktsiooni takistus x_{ad}, sest vastastikune induktsioon rootoriahelatega kutsutakse esile ankrureaktsiooni magnetvälja põhiharmoonilise poolt, millele pikiteljes vastab takistus x_{ad}.

Sekundaarpoolel ahel takistustega $\frac{r_e}{2}$ ja x_{se} vastab ergutusmähi-

sele, kusjuures r_e ja x_{se} on ergutusmähise aktiiv- ja puistetakistused, taandatuna ankrumähisele.[1] Kuna $s = 2$, siis skeemis esineb takistus $\frac{r_e}{2}$. Ahel takistustega $\frac{r_{sd}}{2}$ ja x_{ssd} vastab summutusmähisele, haarates staatorile taandatud aktiiv- ja puistetakistuse väärtusi. Rootori enda, samuti summutusmähise ebasümmeetria tõttu on viimase parameetrid piki- ja põikiteljes pulseerivate voogude suhtes erinevad, mida näidatakse indeksitega d ja q.



Joon. 34-4. Sünkroonmasina aseskeemid vastujärgnevusvooludele ($r \neq 0$): *a* — pikiteljes, *b* — põikiteljes

Vastujärgnevusrežiimi puhul põikiteljes esinevatele protsessidele vastab aseskeem joonisel 34-4, *b*. Magneetimisahelas paikneb põikiteljeline ankrureaktsiooni takistus x_{aq}. Kuna põikiteljes ergutusmähis puudub, siis sekundaarpoolel on ainult summutusmähisele vastavad takistused.

Nagu eelnevas selgitatud, on joonisel 34-4 toodud aseskeemide takistused joonisel 34-2 kujutatud skeemide takistustest palju väiksemad:

$$Z_d'' < Z_d,\ Z_q'' < Z_q.$$

Joonisel 34-4 esitatud aseskeemides on aktiivtakistused võrreldes induktiivtakistustega väikesed ega mõjuta oluliselt skeemi kogutakistusi, mistõttu need võib skeemidest hoopis välja jätta. Siis saame joonisel 34-5 esitatud lihtsustatud skeemid. Induktiivtakistusi

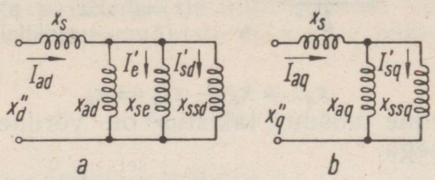
$$x_d'' = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{se}} + \frac{1}{x_{ssd}}} \qquad (34\text{-}1)$$

ja

$$x_q'' = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{ssq}}} \qquad (34\text{-}2)$$

[1] Siin ja allpool esinevad ainult staatorile taandatud rootorimähiste takistuste väärtused ning lihtsuse mõttes jäetakse takistuste taandamist tähistavad prim-märgid välja.

nimetatakse vastavalt *piki- ja põikiteljelisteks ülimööduvateks induktiivtakistusteks.* Selline nimetus on tingitud asjaolust, et need takistused iseloomustavad sünkroonmasinat ka mööduvais ehk siirdeprotsessides (vt. lähemalt ptk. XXXV).

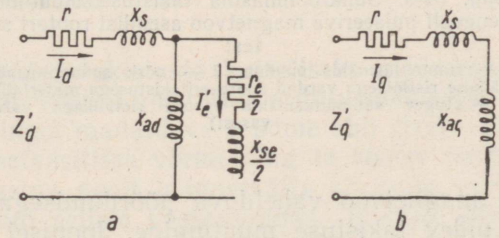


Joon. 34-5. Sünkroonmasina aseskeemid vastujärgnevusvooludele ($r = 0$): *a* — pikiteljes, *b* — põikiteljes

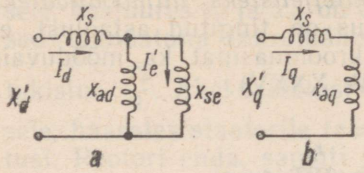
Spetsiaalsed summutusmähised võivad masinatel puududa, nende asemel aga võivad summutusahelad esineda varjatud kujul, nagu näiteks turbomasinate puhul massiivne rootor ning nähtavate poolustega masinate puhul pooluskingad ja poolused ise, kui nad on massiivsed. Kui aga nähtavate poolustega masinate pooluskingad ja poolused ise on valmistatud elektrotehnilisest teraslehtedest ning summutusmähised puuduvad, siis tuleb joonisel 34-4 ja 34-5 esitatud skeemides summutusahelate takistusi lugeda lõpmatu suurteks. Need ahelad langevad seega välja ning tulemusena saame summutusmähiste või -ahelate puudumisel joonistel 34-6 ja 34-7 esitatud aseskeemid. Induktiivtakistust

$$x_d' = x_s + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{se}}} \qquad (34\text{-}3)$$

nimetatakse *mööduvaks pikiteljeliseks induktiivtakistuseks,* induktiivtakistust x_q' aga *mööduvaks põikiteljeliseks induktiivtakistuseks:*



Joon. 34-6. Sünkroonmasina aseskeemid vastujärgnevusvooludele summutusmähiste puudumisel ($r \neq 0$): *a* — pikiteljes, *b* — põikiteljes



Joon. 34-7. Sünkroonmasina aseskeemid vastujärgnevusvooludele summutusmähiste puudumisel ($r = 0$): *a* — pikiteljes, *b* — põikiteljes

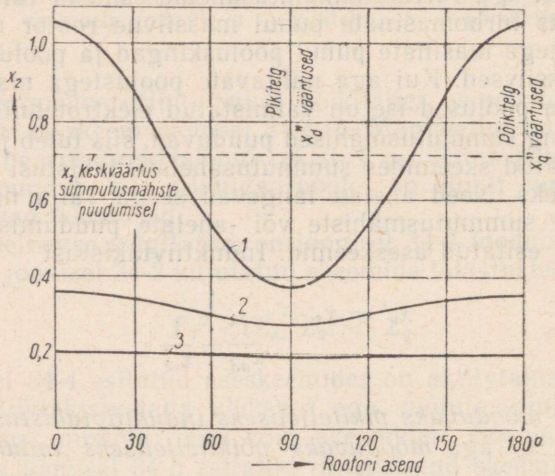
$$x_q' = x_s + x_{aq} = x_q. \qquad (34\text{-}4)$$

Seega põikiteljeline mööduv takistus on võrdne põikitelje sünkroonse takistusega.

On selge, et

$$Z_d'' < Z_d', \; Z_q'' < Z_q', \quad x_d'' < x_d', \; x_q'' < x_q',$$

sest iga sekundaarahela katkestamine suurendab kogu skeemi takistust. Seega summutusmähiste puudumisel on sünkroonmasina vastujärgnevustakistused suuremad.



Joon. 34-8. Sünkroonmasina takistuse muutumine olenevalt pulseeriva magnetvoo asendist rootori suhtes:

1 — summutusmähis puudub, *2* — nõrk summutusmähis (väikese ristlõikega vardad suure eritakistusega materjalist), *3* — tugev summutusmähis (suure ristlõikega vardad vasest)

Pulseeriva magnetvoo vahelduva pöördumisega ühest teljest teise kaasub pidev takistuse muutumine. Joonisel 34-8 esitatud kõverad näitavad ühe sünkroonmasina takistuse muutumist üksikjuhtumitel, kui summutusmähis puudub (*1*) või ta on valmistatud erinevatest materjalidest ja erinevate ristlõigetega (*2, 3*). Üldi-

selt takistused pikiteljes on väiksemad, sest siis kujuneb täiendav sekundaarahel. Väikese takistusega summutusmähise puhul aga on $Z_q'' \approx Z_d''$ ja $x_d'' \approx x_q''$. Seega tugeva summutusmähise korral on rootor vastujärgnevusvoolude suhtes praktiliselt sümmeetriline.

Sünkroonmasina vastujärgnevustakistust loetakse tavaliselt võrdseks piki- ja põikiteljeliste ülimööduvate takistuste keskväärtusega. Seega summutusmähiste esinemise puhul vastujärgnevusnäivtakistus

$$Z_2 = \frac{Z_d'' + Z_q''}{2} \tag{34-5}$$

ja vastujärgnevus-induktiivtakistus

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}. \tag{34-6}$$

Summutusmähiste puudumisel avalduvad vastavad takistused järgmiselt

$$Z_2 = \frac{Z_d' + Z_q'}{2}, \tag{34-7}$$

$$x_2 = \frac{x_d' + x_q}{2}. \tag{34-8}$$

Vastujärgnevus-induktiivtakistuste suhtelised väärtused sünkroonmasinatele on toodud tabelis 34-1.

Tabel 34-1

Sünkroonmasinate vastujärgnevus-induktiivtakistused suhtelistes ühikutes

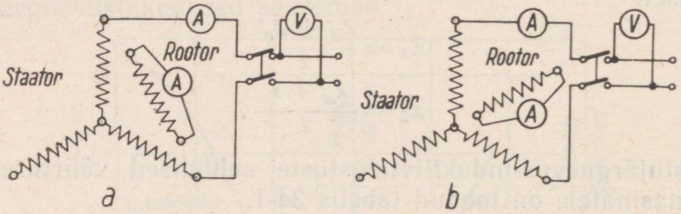
Masina tüüp	x_2^*
Turbogeneraatorid	0,08 ... 0,15
Nähtavate poolustega ja summutusmähistega generaatorid	0,15 ... 0,35
Nähtavate poolustega summutusmähisteta generaatorid ja mootorid	0,30 ... 0,70
Sünkroonkompensaatorid	0,15 ... 0,40

Vastujärgnevustakistuste katseliseks määramiseks võib kasutada järgmist viisi. Lühistatud ergutusmähisega sünkroonmasin lülitatakse pinget madaldava seadme abil (trafo, induktsioonregulaator) kolmefaasilisse võrku ning ta rootor pannakse pöörlema mingi jõumasina poolt magnetvälja kiirusele vastava pöörlemiskiirusega, kuid sellele vastassuunas. Mõõtes võrgust tarbitava võimsuse P, faasipinge U ning -voolu I, leiame:

$$z_2 = \frac{U}{I}, \quad r_2 = \frac{P}{3I^2}, \quad x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}.$$

Summutusmähisega masina puhul saadakse sellisel viisil küllalt täpsed tulemused. Summutusmähiste puudumisel aga takistus muutub suurtes piirides Z_d' kuni Z_q', mille tulemusena voolud ja pinged ei jää enam siinuselisteks, ning see toob kaasa vigade tekkimise mitmesuguste lisanähtuste tõttu.

On võimalik ka staatiliste katsete abil määrata x_d'' ja x_q'' (summutusmähiste puudumisel x_d' ja x_q') ning arvutada nende keskväärtus x_2. Selliste katsete puhul rootor seisab ning tema ergutusmähis on lühistatud vahelduvvoolu-ampermeetriga (joon. 34-9). Kahte tähtlülituses ankrumähise faasi toidetakse madaldatud pingega vahelduvvooluvõrgust ning mõõdetakse kahe faasi pinged U ning voolud I. Ankru vool tekitab pulseeriva magnetvoo. Kui see magnetvoog toimib pikiteljes (ergutusahela ampermeetri hälve on maksimaalne, joon. 34-9, *a*), siis, jagades pinge U voolu I kahekordse väärtusega, saame pikiteljelise takistuse x_d'' või x_d'. Kui aga magnetvoog tegutseb põikiteljes (ergutusahela ampermeetri



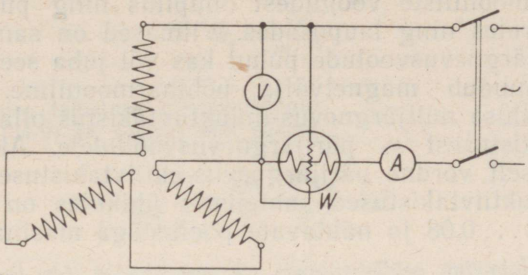
Joon. 34-9. Ülimööduvate induktiivtakistuste määramine staatiliste katsete abil:
a — pikiteljeline takistus x_d'' (või x_d'); *b* — põikiteljeline takistus x_q'' (või x_q')

hälve on null, joon. 34-9, *b*), siis samasugune jagatis annab x_q'' või x_q' väärtuse. Vastavad asendid leiame rootori aeglasel pööramisel, jälgides samal ajal ergutusahela ampermeetri hälbeid. Rootori liigse kuumenemise vältimiseks on soovitav, et ankru vool ei ületaks seejuures 25% nimivoolust.

Nulljärgnevusvoolud ja -takistused. Puhtal kujul nulljärgnevusvooludega režiimi sünkroonmasinas saame, kui ühendame tema ankru mähise faasid järjestikku ning toidame neid madaldatud pingega vahelduvvooluvõrgust (joon. 34-10). Lülitades ahelasse ka vattmeetri, voltmeetri ja ampermeetri, on võimalik määrata takistused Z_0, r_0 ja x_0 nulljärgnevusvooludele ühe faasi kohta:

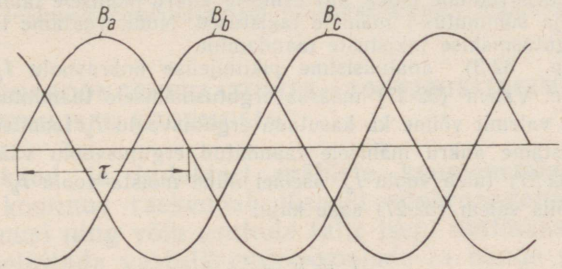
$$Z_0 = \frac{U}{3I}, \qquad r_0 = \frac{P}{3I^2}, \qquad x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}.$$

Katse teostamisel vastavalt joonisel 34-10 on kõikide faaside voolud võrdsed ja ilma ajalise faasinihketa, mis definitsiooni



Joon. 34-10. Nulljärgnevustakistuste määramine

kohaselt moodustabki nulljärgnevusvoolude süsteemi. Üksikud faasimähised tekitavad siis õhupilus ajaliselt faasis, kuid ruumiliselt 120° võrra nihutatud magnetvälja põhiharmoonilised (joon. 34-11). Need summas aga moodustavad nulli ning seega null-



Joon. 34-11. Üksikute mähisefaaside õhupilu magnetväljade põhiharmoonilised nulljärgnevusvoolude puhul

järgnevusvoolude puhul ankru mähise voo põhiharmooniline õhupilus puudub. Samuti võib kindlaks teha, et hävivad ka kõik kolmega mittejaguvad magnetvälja harmoonilised ($\nu = 5, 7, 11 \ldots$) ning jäävad ainult kolmega jaguvad paaritu-harmoonilised ($\nu = 3, 9, 15 \ldots$).

Kuna ankru mähise põhimagnetväli nulljärgnevusvoolude puhul hoopis puudub ning seega olulisi vastastikuse induktsiooni protsesse staatori ja rootori mähiste vahel ei toimu, siis ka sellised asjaolud nagu summutusmähiste olemasolu või nende puudumine, rootori pöörlemiskiirus jne. ei mõjuta oluliselt nulljärgnevusvoolude takistuste suurusi. Põhimõtteliselt on ülalkirjeldatud katset õigem teostada rootori pöörlemisel nimikiirusega ning lühistatud ergutusmähisega.

Põhimagnetvoo puudumise tõttu kujuneb nulljärgnevus-induktiivtakistus väikeseks. Selle olemasolu üldse on tingitud ainult

esinevate harmooniliste voogudest õhupilus ning puistemagnetvoogudest uuretes ning lauposades. Viimased on samuti väiksemad kui pärijärgnevusvoolude puhul kas või juba seetõttu, et ka lauposades puudub magnetvälja põhiharmooniline. Seepärast võib ankru mähise nulljärgnevus-induktiivtakistus olla isegi väiksem puistetakistusest x_s pärijärgnevusvooludele. Aktiivtakistus r_0 on praktiliselt võrdne pärijärgnevus-aktiivtakistusega r. Nulljärgnevus-induktiivtakistused suhtelistes ühikutes on turbogeneraatoritel 0,02 ... 0,08 ja nähtavate poolustega masinatel 0,03 ... ... 0,20.

Kuigi sünkroonmasinate endi nulljärgnevustakistused on väikesed, tuleb arvestada seda, et ekspluatatsiooni tingimustes kogutakistused nulljärgnevusahelates, arvestades maandamisseadmete, maa ja nulljuhtmete takistusi, võivad kujuneda isegi väga suurteks. Kui aga mähiste nullpunkt on maandamata ja nulljuhe puudub, siis nulljärgnevusahelate takistus on lõpmata suur.

Induktori mähiste taandamisest ankru mähisele. Eespool on antud aseskeemid vastujärgnevusvoolude jaoks, kus esinesid ankru mähisele taandatud induktori (ergutus- ja summutus-) mähiste takistused. Nüüd vaatame lähemalt, kuidas toimub ergutusmähise takistuste taandamine.

Varem (p. 32-3) analüüsisime pikiteljelise ankruvoolu I_d taandamist ergutusmähisele. Valem (32-27) määras ergutusmähisele taandatud voolu suuruse I_d'. Sama valemit võime ka kasutada ergutusvoolu I_e taandamiseks ankru mähisele. Tähistame ankru mähisele taandatud ergutusvoolu väärtuse tähega I_e'. Valemis (32-27) tuleb voolu I_d' asemel nüüd mõista voolu I_e ja I_d asemel vastavalt I_e'. Siis valem (32-27) saab kuju:

$$I_e = k_{iad} I_e',$$

millest leiamegi ankru mähisele taandatud ergutusvoolu

$$I_e' = k_{ea} I_e, \tag{34-9}$$

kus

$$k_{ea} = \frac{1}{k_{iad}} = \frac{\pi}{\sqrt{2} \cdot 2m} \frac{w_e}{w k_w k_d} \tag{34-10}$$

on *ergutusvoolu taandamistegur*.

Aseskeemides joonistel 34-4,*a*, 34-5, *a*, 34-6, *a* ja 34-7, *a* tuleb kasutada ergutusmähise taandatud voolu suurusi.

Kui oleme ergutusmähise taandanud ankru mähisele, siis vastab see kujutlusele, et reaalse ergutusmähise asemel on meil nüüd kolme- või m-faasiline mähis samasuguste andmetega nagu ankru mähiski. Energiakaod taandatud ergutusmähises peavad aga olema võrdsed reaalses ergutusmähises esinevatega. Seega

$$I_e^2 r_e = m I_e'^2 r_e',$$

millest

$$r_e' = k_e r_e, \tag{34-11}$$

kus

$$k_e = \frac{l_e^2}{m l_e'^2}$$

on ergutusmähise takistuse taandamistegur.

Avaldiste (34-9) ja (34-10) abil saame

$$k_e = \frac{1}{m k_{ea}^2} = \frac{8m}{\pi^2} \cdot \frac{w^2 k_w^2}{w_e^2} k_d^2. \qquad (34\text{-}12)$$

Sama teguri abil taandatakse ka ergutusmähise puistetakistus x_{se} ankru mähisele:

$$x_{se}' = k_e x_{se}.$$

Joonisel 34-4, *a*, samuti teistel joonistel esitatud aseskeemides tuleb kasutada just taandatud puistetakistust x'_{se}.

Summutusmähise parameetrite taandamine ankru mähisele toimub analoogiliselt lühisrootoriga asünkroonmasina rootori parameetrite taandamisega staatorimähisele. Üksikasjalikud valemid induktori mähiste taandatud parameetrite arvutamiseks leiduvad elektrimasinate projekteerimiseks määratud teostes.

34-3. SÜNKROONGENERAATORITE TÖÖTAMISTINGIMUSED EBASÜMMEETRILISEL KOORMUSEL

Energiakaod ja induktori mähiste kuumenemine. Ebasümmeetriline koormus raskendab tõsiselt sünkroongeneraatori töötamistingimusi ning võib osutuda talle isegi ohtlikuks. Selle põhjust võib selgitada vastujärgnevusvoolude ja nende poolt tekitatud vastujärgnevus-magnetvälja tekkimisega. Nulljärgnevusvoolud õhupilus põhimagnetvälja ei tekita ning seoses sellega nad ei kujune ohtlikuks. Pealegi on sünkroongeneraatorite tähtlülituses ankrumähiste nullpunktid tavaliselt isoleeritud või suuremate võimsuste puhul maandatud (releekaitse teostamise otstarbeks) üle suhteliselt suurte takistuste, mistõttu ei saa tekkida märkimisväärseid nulljärgnevusvoole. Vastujärgnevusvoolud esinevad aga ebasümmeetriliste koormuste puhul alati ning nende suurus oleneb põhiliselt tarbija iseloomust.

Vastujärgnevus-magnetvoog, pööreldes suure kiirusega induktori suhtes, indutseerib induktori mähistes ja massiivsetes metallosades voole, mis suurendavad energiakadusid masinas, halvendavad kasutegurit ning kutsuvad esile induktori mähiste ja osade täiendava kuumenemise. Just viimane asjaolu ohustabki masinat.

Normaalsele ergutusvoolule ergutusmähises lisandub vastujärgnevusvoo poolt indutseeritud vahelduvvool, mis suurendab ergutusmähises esinevaid energiakadusid. Vastavad arvutused ja katsed küll näitavad, et need lisavoolud ei ole kuigi ohtlikud, sest ergutusmähise induktiivne puistetakistus on suhteliselt suur ja

lisavoolud ei kujune suureks. Tõsist ohtu kujutavad aga massiivsetes metallosades, eriti turbogeneraatorite massiivsetes rootorites indutseeritavad voolud, sest need on üsna tugevad ja tõstavad märgatavalt rootori temperatuuri. Et tavaliselt ergutusmähises eralduv soojus suundub läbi isolatsioonikihi rootorikehale, siis normaalselt on ergutusmähise temperatuur alati suurem rootorikeha temperatuurist. Temperatuuri tunduva tõusu tõttu aga rikneb ergutusmähise isolatsioon kiiresti. Peale selle tekivad turbogeneraatorite rootorites ohtlikud soojuslikud deformatsioonid.

Nähtavate poolustega masinates on olukord kergem juba sellepärast, et poolused on üksteisest eraldatud õhuvahemikega ning ei moodusta massiivset silindrilist keha, mis soodustaks voolude teket. Pealegi valmistatakse tänapäeval pooluskehad teraslehtedest, mis ei ole küll üksteisest otseselt isoleeritud, kuid omavad siiski teatavat loomulikku isolatsiooni oksüüdikihi näol. Seega summutusmähise puudumisel ei tekita vastujärgnevusvoog induktoris kuigi suuri energiakadusid. Kui aga summutusmähis on olemas, ei teki siiski suurt ergutusmähise ülekuumenemise ohtu, sest nähtavate poolustega masinate puhul toimub ergutusmähise jahutamine tavaliselt mitte poolusekeha kaudu, vaid vahetult poolustevahelisest ruumist läbipuhutava õhu abil. Seevastu summutusmähises endas esinevad suured kaod.

Seega on vastujärgnevusvoolud rootori kuumenemise tõttu väga ohtlikud just turbogeneraatorites ning summutusmähisega varustatud nähtavate poolustega masinate puhul.

Vibratsioon. Ergutusvoolu poolt tekitatud pooluste voo ning viimase suhtes pöörleva vastujärgnevusvoo vastastikusel toimel kujunevad perioodiliselt oma suunda või märki muutvad mehaanilised jõud. Esineb nii radiaalse kui ka tangentsiaalse iseloomuga jõude. Esimesed püüavad õhupilu rootori ja staatori vahel vaheldumisi suurendada ja vähendada, teised aga rootorit kiirendada ja aeglustada. Mõlemat liiki jõud on rakendatud nii rootorile kui ka staatorile. Nad põhjustavad masinate osade vibratsiooni ja müra, kahjustavad kinnitusdetaile, kutsuvad esile staatori rauapaki kokkusurutuse vähenemise. Eriti ohtlikuks võivad osutuda staatori kere sõrestiku keevitusühendustele mõjuvad perioodilised jõud väsimusnähtuste tagajärjel. Vaadeldav vibratsioon toimub kahekordse võrgusagedusega.

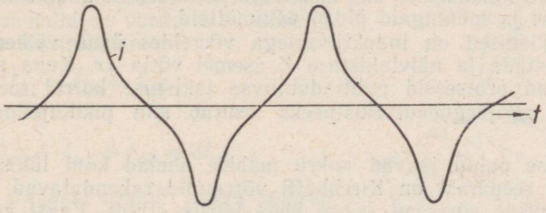
Tekkivad vibratsioonijõud on loomulikult seda suuremad, mida suuremad on vastujärgnevusvoolud. Viimaste intensiivse ja pideva mõjumise korral võib masin ruttu rivist välja langeda.

Pingete süsteemi moonutus. Ebasümmeetrilise koormuse puhul on pingelangud üksikutes faasides erinevad ning kolmefaasiline pingesüsteem moonutub, s. o. faasi- ja liinipinged ei ole enam võrdsed. Pingete moonutus on seda suurem, mida suuremad on vastujärgnevusvoolud I_2 ning vastujärgnevustakistused Z_2, sest vastujärgnevusvoolude poolt tekitatav pingelang on I_2Z_2, kus-

juures erinevates faasides on see põhipingete suhtes erineva suunaga. Moonutatud pingesüsteem häirib tarbijate, eriti asünkroonmootorite tööd.

Kuna summutusmähistega, samuti massiivsete rootoritega masinatel on vastujärgnevustakistused väiksemad, siis on neil masinatel ka väiksemad pingesüsteemi moonutused. Füüsikaliselt seletub see asjaoluga, et summutusmähistes indutseeritud voolud tekitavad oma magnetvoo, mis nõrgendab ankru mähise primaarset vastujärgnevus-magnetvoogu ning mille tulemusena viimase poolt ankru mähises indutseeritud elektromotoorsed jõud samuti vähenevad. Kui on tegemist tugeva summutusmähisega, mille vasekogus on suur ja aktiivtakistus seega väike, siis vastujärgnevusvoog jääb võrdlemisi nõrgaks ning pingetesüsteemi moonutus kujuneb väikeseks.

Pingete ja voolude kõrgemad harmoonilised. Nagu selgitatud p. 34-2, ei ole sünkroonmasina takistus vastujärgnevusvooludele konstantne, vaid muutub iga perioodi vältel vastujärgnevusvoo libisemise tõttu pooluste suhtes. Seepärast vastujärgnevusvool pulseerib suure sagedusega ning ei ole enam siinuseline. Vastavalt pole siinuseline ka kogu ankruvool, vaid ta sisaldab kõrgemaid harmoonilisi. Suhteliselt suurteks kujunevad voolude kõrgemad harmoonilised ebasümmeetriliste lühiste puhul, sest siis on ainsaks voolu suurust ja kuju määravaks teguriks ankru mähise enda takistused, sest välistakistuse tasandav mõju kaob. Joonisel 34-12 on näidatud summutusmähiseta nähtavate üksikpoolustega masina ankru voolu kõvera kuju kahefaasilisel lühisel.



Joon. 34-12. Sünkroongeneraatori staatori mähise voolukõvera ajaline kulg kahefaasilise lühise puhul

Voolu kõrgemad harmoonilised võivad esile kutsuda ohtliku pingeresonantsi nähte juhul, kui generaatori ankru vooluahelad sisaldavad mahtuvust. Niisugune juhtum esineb näiteks siis, kui hüdroelektrijaama generaatorid on tarbijatega ühendatud pika kõrgepingeliini kaudu, mis teatavasti omab suurt mahtuvust, ning kui toimub kahefaasiline lühis liinil jaamast küllalt kaugel asuvas punktis. Pingeresonantsi tõttu hakkab ankru mähise klemmipinge muutuma vastava kõrgema harmoonilise sagedusega. Need võnkepinged võivad mitmekordselt ületada nimipinge ning vigastada isolatsiooni. Seepärast on soovitav pikkadele liinidele töö-

tavad generaatorid varustada summutusmähistega, sest siis olukord masina piki- ja põikiteljes ühtlustub (vt. joon. 34-9) ning kõrgemaid harmoonilisi voolus ei teki. Nii on näiteks ka Kuibõševi ja Stalingradi hüdrojaamade generaatorid varustatud summutusmähistega. Tuleb veel märkida, et summutusmähiste positiivne mõju ei piirdu ainuüksi kirjeldatuga, teiselt poolt aga on nende toime mõnes suhtes ka negatiivne. Lähemalt käsitletakse neid momente allpool vastavates kohtades.

Lubatav koormuse ebasümmeetria. Koormuse ebasümmeetriat tuleb piirata kõigepealt rootori kuumenemise ja vibratsioonide seisukohalt. NSV Liidu elektrimasinate põhistandardi ГОСТ 183-55 kohaselt lubatakse töötamisel faasivoolude erinevust turbogeneraatoritel 10% ja hüdrogeneraatoritel ning sünkroonkompensaatoritel 20%, kusjuures ükski faasivool ei tohi ületada nimivoolu. Pingete moonutus sellise ebasümmeetria puhul jääb mõne protsendi piiridesse ja seega ei oma olulist tähtsust.

Ebasümmeetriliste lühiste puhul kujunevad voolud siiski küllaltki suureks, kuid niisugused lühised kõrvaldatakse väga ruttu kiiresti töötava releekaitse süsteemi poolt.

34-4. EBASÜMMEETRILISED LÜHISED

Ebasümmeetriliste lühiste puhul esinevate voolude kindlaksmääramine on oluline energiasüsteemi avariiolukorras ja releekaitse- ning automaatikaseadmete häälestamise seisukohast. Püstitatud küsimuse rangeks lahendamise viisiks on analüütiline meetod. Kuna aga viimase täielik rakendamine antud juhul osutub mõnevõrra kohmakaks, siis kasutame paralleelselt analüütilise meetodiga vektordiagramme ja mõningaid üldisi põhimõtteid.

Et aktiivtakistused on induktiivsetega võrreldes üsna väikesed, siis võib neid mitte arvestada ja näivtakistuse Z asemel võtta jx. Kuna pärijärgnevusvooludega seotud protsessid puhtinduktiivse takistuse korral toimuvad ainult pikiteljes, siis pärijärgnevustakistuseks osutub siin pikiteljeline sünkroonne takistus x_d.

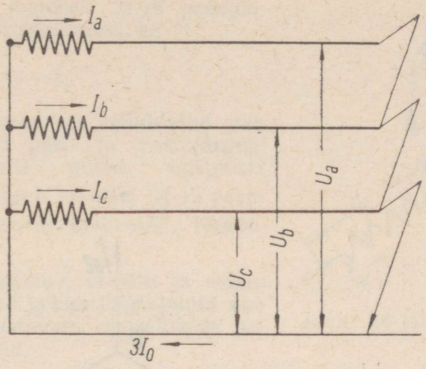
Välise lühise puhul jäävad ankru mähise ahelad kuni lühisekohani sümmeetrilisteks ja seepärast on Kirchhoffi võrrandid rakendatavad iga sümmeetriliste komponentide süsteemi kohta ühes faasis eraldi. Edasi koostame need võrrandid A-faasi kohta. Olgu (joon. 34-13) faasipinged U_a, U_b, U_c määratud lühisepunkti kohal, s. o. lühisepunkti ja nulljuhtme või nullpunkti vahel. Ankru mähises indutseeritud elektromotoorsed jõud on määratavad summana pingelangust ahelas kuni lühisepunktini ning pingest lühisepunktis. Et ergutusvool indutseerib ankru mähises ainult pärijärgnevuse elektromotoorse jõu, mida A-faasis tähistame E-ga, siis on võimalik antud faasile Kirchhoffi võrrandid päri-, vastu- ja nulljärgnevussüsteemide kohta kirjutada järgmisel kujul:

$$\dot{E} = \dot{U}_{a1} + j\dot{I}_{a1}x_d, \tag{34-13}$$

$$0 = \dot{U}_{a2} + j\dot{I}_{a2}x_2, \tag{34-14}$$

$$0 = \dot{U}_{a0} + j\dot{I}_{a0}x_0. \tag{34-15}$$

Siin $\dot{U}_{a1}$ ja $\dot{I}_{a1}$ on päri-, $\dot{U}_{a2}$ ja $\dot{I}_{a2}$ vastu- ning $\dot{U}_{a0}$ ja $\dot{I}_{a0}$ nulljärgnevuspinge ja -voolude komponendid A-faasis, x_2 ja x_0 aga vastu- ja nulljärgnevustakistu-



Joon. 34-13. Faasipinged ja -voolud ebasümmeetrilise lühise puhul

sed. Toodud võrrandid kehtivad kõikide lühiseliikide kohta ning edaspidi kasutamegi neid lühisevoolude leidmiseks, oletades, et lühis toimub tühijooksu olukorras.

Ühefaasiline lühis, s. o. lühis mingi faasijuhtme ja nulljuhtme, nullpunkti või maa vahel, esineb kõige sagedamini.

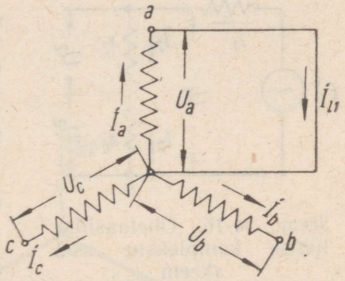
Oletame, et lühistatud on faas A (joon. 34-14). Siis on faasi A pinge null ($\dot{U}_a = 0$) ja faaside B ning C voolud samuti võrdsed nulliga ($\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$). Niisugusel juhul voolude päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponentide vektordiagrammid vastavad joonisel 34-15 jämedamate joontega näidatule, kusjuures A-faasi kõik voolude komponendid on võrdsete suurustega ja ilma ajalise faasinihketa:

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0}.$$

A-faasi vool

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = 3\dot{I}_{a0}$$

ning B- ja C-faasi voolud, nagu selgub joonisel 34-15 esitatud konstruktsioonist, võrduvad tõepoolest nulliga.



Joon. 34-14. Ühefaasiline lühis

Arvestades, et A-faasi pinge

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} \qquad (34\text{-}16)$$

on samuti null, saame avaldiste (34-13), (34-14) ja (34-15) liitmisel, et

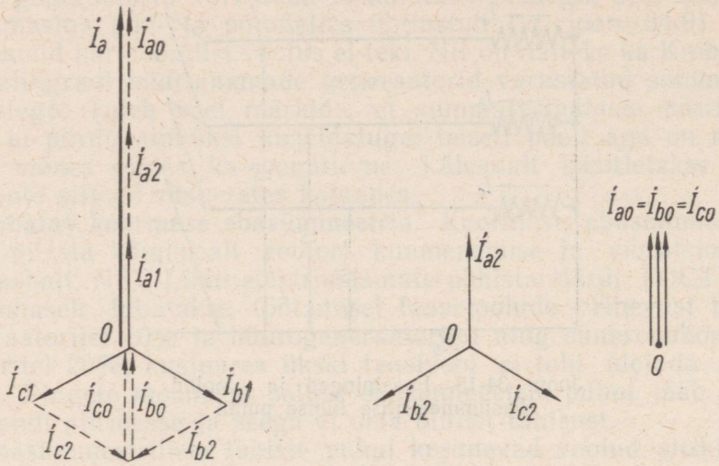
$$\dot{E} = j\dot{I}_{a1}(x_d + x_2 + x_0).$$

Siit leiame:

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = \frac{\dot{E}}{j(x_d + x_2 + x_0)} \qquad (34\text{-}17)$$

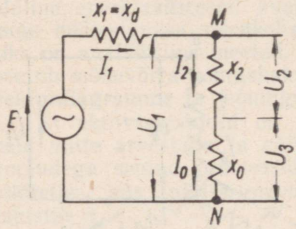
ning resulteeriv ühefaasilise lühise vool faasis A

$$I_{l1} = \frac{3E}{x_d + x_2 + x_0}. \qquad (34\text{-}18)$$



Joon. 34-15. Ühefaasilise lühise voolude vektordiagrammid

Saadud tulemuste alusel on võimalik koostada joonisel 34-16 esitatud ühefaasilise lühise kompleksne aseskeem, mis võimaldab lihtsalt määrata kõik suuruslikud vahekorrad ilma eeltoodud võrrandeid koostamata ja lahendamata.



Joon. 34-16. Ühefaasilise lühise kompleksne aseskeem

Joonisel on generaator esitatud oma emj. E ja pärijärgnevustakistusega $x_1 = x_d$. Generaatorist väljuvad kaks liinijuhet, mis lühisepunktis MN on lühistatud järjestikku ühendatud vastu- ja nulljärgnevustakistuse kaudu. Kompleksses aseskeemis läbib pärijärgnevustakistust pärijärgnevusvool, samuti esineb vastujärgnevustakistusel vastujärgnevuspinge jne. On kerge näha, et joon. 34-16 vastab täiel määral ühefaasilise lühise jaoks saadud vahekordadele, näiteks avaldisele (34-17) jne.

Siin esitatud ühefaasilise lühise kompleksne aseskeem, samuti allpool toodavad teiste lühiseliikide kompleksed aseskeemid on põhimõtteliselt (takistuste ühendamise printsiip, voolude jagunemine jne.) rakendatavad ka keerukamates võrkudes esinevate lühiste puhul.

Kahefaasiline lühis. Olgu lühistatud omavahel faasid B ja C (joon. 34-17). Siis on $\dot{I}_a = 0$ ning $\dot{U}_b = \dot{U}_c$ (lühise- ja nullpunkti vahel mõõdetavad pinged). Samuti on $\dot{I}_b = -\dot{I}_c$. Nulljärgnevusvool $\dot{I}_0 = 0$, kuna vool nulljuhtmes puudub. Vastavalt siis ka $\dot{U}_0 = 0$.

Sellised voolude vahekorrad on rahuldatud joonisel 34-18 jämeda joonega esitatud päri- ja vastujärgnevusvoolude vektordiagrammidel, kusjuures A faasi päri- ja vastujärgnevusvoolud on võrdsed ja vastassuunalised ($\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1}$). Seetõttu tõepoolest

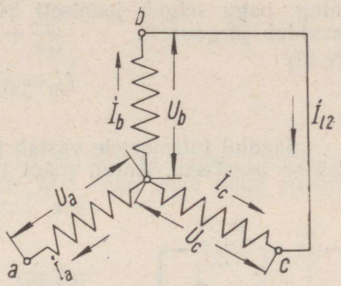
$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0$$

ning, nagu selgub jooniselt 34-18 peenjoonega teostatud konstruktsioonist, ka

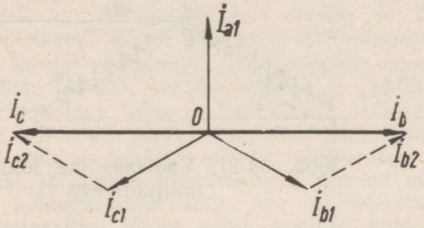
$$\dot{I}_b = -\dot{I}_c.$$

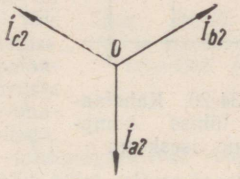
Pingete vahekorrad on rahuldatud joonisel 34-19 esitatud päri- ja vastujärgnevus-vektordiagrammide puhul, kusjuures $\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{a2}$. Nagu selgub joonisel 34-19 peenjoontega esitatud konstruktsioonist, tõepoolest $\dot{U}_b = \dot{U}_c$.

On võimalik tõestada, et siin ja eelmises alapunktis toodud vektordiagrammid ainsana rahuldavad vastavate lühiseliikide puhul püstitatud nõudeid.

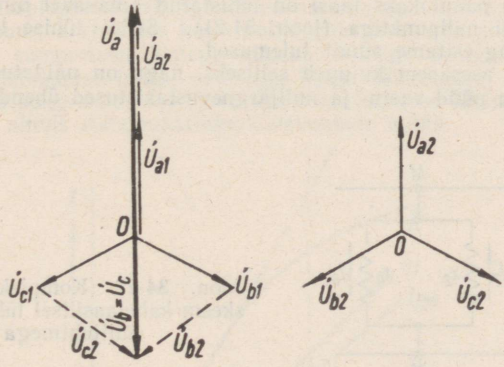


Joon. 34-17. Kahefaasiline lühis





Joon. 34-18. Kahefaasilise lühise voolude vektordiagrammid



Joon. 34-19. Kahefaasilise lühise pingete vektordiagrammid

Arvestades ülaltoodut, lahutame võrrandist (34-13) võrrandi (34-14); siis saame:

$$\dot{E} = \mathrm{j}\dot{I}_{a1}x_d - \mathrm{j}\dot{I}_{a2}x_2 = \mathrm{j}\dot{I}_{a1}(x_d + x_2).$$

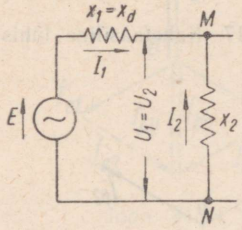
Seega

$$\dot{I}_{a1} = -\dot{I}_{a2} = \frac{\dot{E}}{\mathrm{j}(x_d + x_2)} \qquad (34\text{-}19)$$

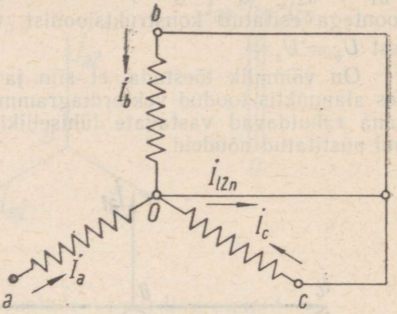
ning, nagu selgub jooniselt 34-18, kahefaasilise lühise vool faasis B või C avaldub järgmiselt:

$$I_{l2} = \sqrt{3} I_{a1} = \frac{\sqrt{3}E}{x_d + x_2}. \qquad (34\text{-}20)$$

Saadud tulemustele vastab joonisel 34-20 toodud kahefaasilise lühise kompleksne aseskeem. Antud juhul tuleb lühisepunkti sisse tuua takistus x_2.



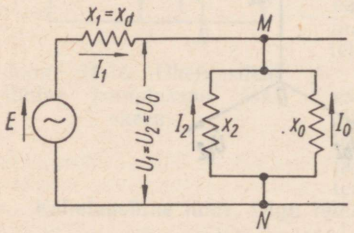
Joon. 34-20. Kahefaasilise lühise kompleksne aseskeem



Joon. 34-21. Kahefaasiline lühis koos nulljuhtmega

Kahefaasiline lühis koos nulljuhtmega. On võimalik veel üks kahefaasilise lühise liik, mille puhul kaks faasi on lühistatud omavahel ning samal ajal ka nulljuhtmega või nullpunktiga (joon. 34-21). Selle lühise lähema analüüsi jätame välja ning esitame ainult tulemused.

Kompleksne aseskeem kujuneb selliseks, nagu on näidatud joonisel 34-22. Lühisepunktis on nüüd vastu- ja nulljärgnevustakistused ühendatud rööbiti.



Joon. 34-22. Kompleksne aseskeem kahefaasilisel lühisel koos nulljuhtmega

Joonise 34-22 alusel võib koostada ka avaldised voolude sümmeetriliste komponentide kohta. Siinkohal toome ainult nulljuhtme voolu I_{l2n} avaldise:

$$I_{l2n} = \frac{3E}{x_d + x_d \frac{x_0}{x_2} + x_0} \qquad (34\text{-}21)$$

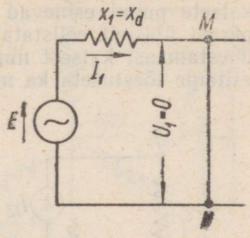
ning faasi lühisvoolu $I_{l20} = I_b = I_c$ avaldise:

$$I_{E0} = \frac{\sqrt{3}E\sqrt{1 + \frac{x_0}{x_2} + \frac{x_0^2}{x_2^2}}}{x_d + x_d\frac{x_0}{x_2} + x_0}. \qquad (34\text{-}22)$$

Kolmefaasiline lühis. Võrdluseks toome ka kolmefaasilise lühise kompleksse aseskeemi (joon. 34-23). Lühistatavate punktide MN vahel pole nüüd ühendatud mingit takistust. Kuna x_2 ja x_0 puuduvad, siis ka $I_2 = I_0 = U_2 = U_0 = 0$ ning kogu lühisvool

$$I_{l3} = \frac{E}{x_d} \qquad (34\text{-}23)$$

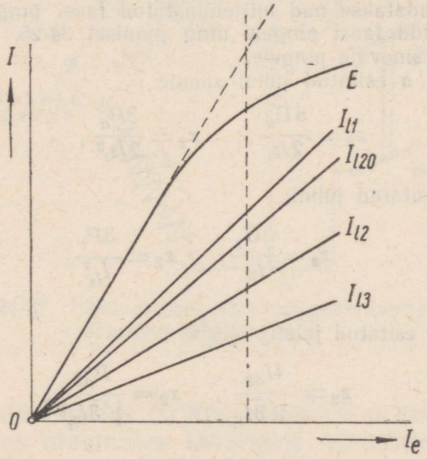
on ka pärijärgnevusvool.



Joon. 34-23. Kompleksne aseskeem kolmefaasilisel lühisel

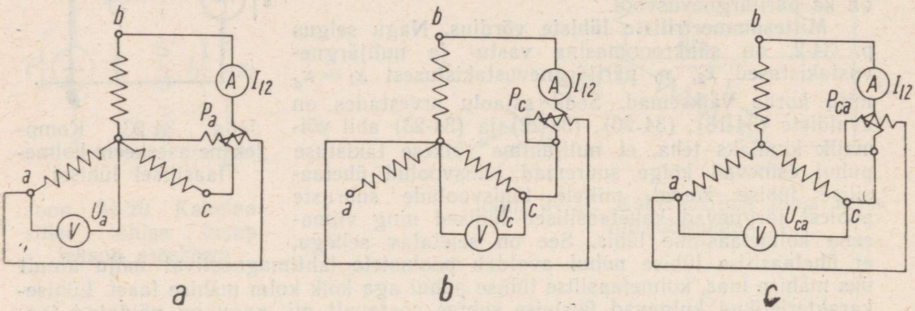
Mittesümmeetriliste lühiste võrdlus. Nagu selgus p. 34-2, on sünkroonmasina vastu- ja nulljärgnevustakistused x_2, x_0 pärijärgnevustakistusest $x_1 = x_d$ mitu korda väiksemad. Seda asjaolu arvestades on avaldiste (34-18), (34-20), (34-22) ja (34-23) abil võimalik kindlaks teha, et nulljuhtme väikese takistuse puhul esinevad kõige suuremad lühisvoolud ühefaasilise lühise korral, millele lühisvoolude suuruste poolest järgnevad kahefaasilised lühised ning viimasena kolmefaasiline lühis. See on seletatav sellega, et ühefaasilise lühise puhul avaldab poolustele lahtimagneetivat mõju ainult üks mähise faas, kolmefaasilise lühise puhul aga kõik kolm mähise faasi. Lühisekarakteristikud kulgevad üksteise suhtes vastavalt nii, nagu on näidatud joonisel 34-24.

Tegelikes ekspluatatsioonitingimustes on aga x_0 teistest palju suurem või isegi lõpmata suur, arvestades kogu nulljärgnevusvoolude ahela takistust. Seepärast kujuneb summutusmähistega masinates kõige suuremaks kahefaasiliste lühiste vool, ühefaasilise lühise vool aga kõige väiksemaks. Summutusmähiste puudumisel võib kõige suuremaks osutuda kolmefaasilise lühise vool. Üldu kehtib loomulikult ainult statsionaarsete lühisvoolude kohta.



Joon. 34-24. Ebasümmeetriliste lühiste karakteristikud

Vastu- ja nulljärgnevustakistuste määramine ebasümmeetriliste lühiste katseandmeil. Varem (p. 34-2) oli juba esitatud mõningaid vastu- ja nulljärgnevustakistuste katselise määramise viise. On ka võimalik nende takistuste määramine ebasümmeetriliste lühiste katseandmeil. Määrame näiteks katseliselt mingisuguse ergutusvoolu väärtuse puhul (joon. 34-24) ühe-, kahe- ja kolmefaasilise lühise voolud I_{l1}, I_{l2}, I_{l3} ning tühijooksul indutseeritud elektromotoorse jõu E (küllastamata väärtuse, sest lühistel küllastust ei esine). Kui asetada saadud väärtused avaldistesse (34-18), (34-20), (34-23), on võimalik viimastest leida x_d, x_2 ja x_0. Selline meetod pole aga eriti täpne, sest üksikute katsete puhul esinevad vead kuhjuvad võrrandite süsteemi lahendamisel. Seepärast üldiselt eelistatakse meetodeid, kus kõik vajalikud andmed saadakse ühestainsast katsest ning pole vajadust lahendada võrrandite süsteeme. Allpool esitame tõestuseta ka mõningad niisugused x_2 ja x_0 määramise viisid.



Joon. 34-25. Skeemid vastujärgnevustakistuste määramiseks kahefaasilise lühise katse andmeil

Takistused z_2, x_2 ja r_2 on võimalik määrata kolmel erineval viisil kahefaasilise lühise katseandmetest (joon. 34-25). Joonisel 34-25 näidatud variandid erinevad ainult voltmeetri ja vattmeetri pingeahela lülitamise viisi poolest. Joonisel 34-25, *a* ühendatakse nad mittelühistatud faasi pingele, joonisel 34-25, *b* aga mingi lühistatud faasi pingele ning joonisel 34-25, *c* — lühistatud ning vaba faasi vahel esinevale pingele.

Joonisel 34-25, *a* esitatud juhul saame:

$$z_2 = \frac{3U_a}{2I_{l_2}}, \qquad x_2 = \frac{3P_a}{2I_{l_2}^2}, \tag{34-24}$$

joonisel 34-25, *b* esitatud juhul:

$$z_2 = \frac{3U_c}{I_{l_2}}, \qquad x_2 = \frac{3P_c}{I_{l_2}^2} \tag{34-25}$$

ja joonisel 34-25, *c* esitatud juhul:

$$z_2 = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}I_{l_2}}, \qquad x_2 = \frac{P_{ab}}{\sqrt{3}I_{l_2}^2}, \tag{34-26}$$

kusjuures

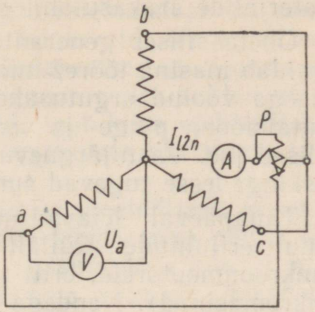
$$r_2 = \sqrt{z^2_2 - x^2_2}.$$

L. Lomonossova ja E. Paali poolt teostatud uurimuse andmeil saadakse parimad tulemused esimesel juhul (joon. 34-25, *a*).

Nulljärgnevustakistusi on võimalik määrata, kui tekitada kahefaasiline lühis nulljuhtmega joonise 34-26 kohaselt. Siis saame:

$$z_0 = \frac{U_a}{I_{l2n}}, \quad r_0 = \frac{P}{I^2_{l2n}}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \qquad (34-27)$$

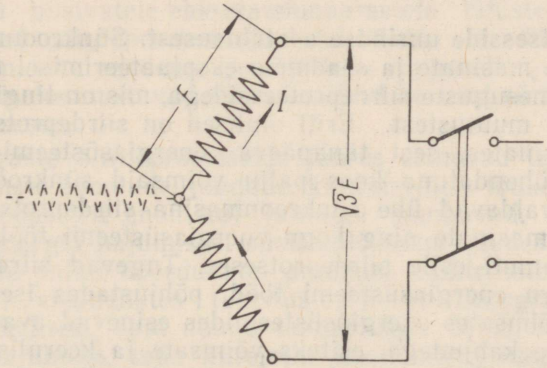
Olgu tähendatud, et summutusmähise puudumisest tekkivad kõrgemad harmoonilised moonutavad saadavaid tulemusi.



Joon. 34-26. Skeem nulljärgnevustakistuste määramiseks kahefaasilisel lühisel koos nulljuhtmega

34-5. ÜHEFAASILINE SÜNKROONGENERAATOR

Ühefaasilist sünkroongeneraatorit võib vaadelda kui tähte ühendatud ankrumähisega kolmefaasilist generaatorit, millel üks faas on tööst välja jäetud (joon. 34-27). Töötava mähiseosa jaoks



Joon. 34-27. Ühefaasilise sünkroongeneraatori iseärasuste selgitamiseks

on siis ära kasutatud ainult $^2/_3$ kogu masina uurete arvust. Tegelikult ühefaasilistes masinates tavaliselt kasutataksegi vaid $^2/_3$ kogu uurete arvust, sest edasisel töötavate uurete arvu suurendamisel pinge kasvab märksa aeglasemalt kui mähise vase kaal.

Ühesuguste magnetvoogude ja ankrumähise voolude puhul (joon. 34-27) on ühefaasilise masina võimsus $\sqrt{3}\,EI$, kolmefaasilise masina võimsus aga $3EI$. Seega ühefaasilise masina võimsus moodustab ainult $\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot 100 = 58\%$ kolmefaasilise masina võimsusest (samade gabariitide korral). Ühefaasilistes masinates on materjalide ärakasutamine seega alati tunduvalt halvem.

Ühefaasilises generaatoris esinev vastujärgnevus-magnetvoog avaldab masina töörežiimidele negatiivset mõju: kahekordse sagedusega voolud ergutusahelas raskendavad ergutusmasina kommutatsiooni, pinge- ja voolukõveras esinevad kõrgemad harmoonilised jne. Vastujärgnevusvoo summutamiseks paigutatakse pooluskingadesse tugevad summutusmähised.

Tänapäeval leiavad ühefaasilised generaatorid kasutamist ainult erijuhtudel. Küllalt laialdaselt aga kasutatakse ühefaasilisi sünkroonmootoreid, eriti võimsusteni kuni mõnisada vatti (nn. mikromasinad). Nendega tutvume lähemalt allpool.

XXXV PEATÜKK

SÜNKROONMASINA JÄRSK LÜHIS

35-1. SÜNKROONMASINATE SIIRDEPROTSESSIDE ÜLDINE ISELOOMUSTUS JA UURIMISMEETODID

Siirdeprotsesside uurimise osatähtsusest. Sünkroonmasinate ja samuti teiste masinate ja seadmete ekspluateerimisel tuleb kokku puutuda mitmesuguste siirdeprotsessidega, mis on tingitud järskudest režiimi muutustest. Eriti olulised on siirdeprotsessid just sünkroonmasinates, sest tänapäeva energiasüsteemides töötab elektriliselt ühendatuna koos palju võimsaid sünkroonmasinaid. Seejuures avaldavad ühe sünkroonmasina siirdeprotsessid suurt mõju teiste masinate ning kogu energiasüsteemi tööle, kutsudes viimastes samuti esile siirdeprotsesse. Tugevad siirdeprotsessid häirivad kogu energiasüsteemi tööd, põhjustades isegi avariide tekkimisi. Võimsates energiasüsteemides esinevad avariid on aga seotud suurte kahjudega, esiteks võimsate ja keeruliste tööseadmete riknemise tõttu, sagedamini aga ulatusliku majanduspiirkonna elektrienergiaga varustamise häirete tõttu, sest suurte tehaste, kaevanduste jne. isegi lühiajaline seisak põhjustab tohutut toodangu kaotust.

Mainitud põhjustel omab sünkroonmasinate siirdeprotsesside tundmaõppimine äärmiselt suurt praktilist tähtsust, sest see võimaldab neid õigesti mõista, ette näha võimalikke avariiolukordi, võtta tarvitusele abinõusid viimaste vältimiseks või nende mõju

piiramiseks ning tagajärgede kiiremaks kõrvaldamiseks. Tuleb rõhutada, et sünkroonmasinate siirdeprotsessid kulgevad äärmiselt kiiresti, mõne sekundi või isegi sekundi murdosade vältel. Seepärast ei ole teenindav personal enamikul juhtudel suuteline avarii alghetkel ennast vahele segama ning on vaja rakendada mitmesuguseid automaatseadmeid, et mõjutada tekkinud siirde- ja avariiprotsesse vajalikus suunas. Selliste seadmete projekteerimisel, ehitamisel, töölerakendamisel ja häälestamisel on samuti vaja hästi tunda sünkroonmasinates toimuvaid siirdeprotsesse.

Tänapäeval on sünkroonmasinate siirdeprotsesside teooria küllaltki kaugele välja arenenud. Suure panuse selles suhtes on teinud NSV Liidu teadlased ja insenerid, sest kiire elektrifitseerimise areng Nõukogude Liidus nõudis vastavate küsimuste sügavat uurimist.

Siirdeprotsesside iseloomust ja uurimise meetoditest. Range ja täpne sünkroonmasinate siirdeprotsesside käsitlemine nõuab üsna keeruliste matemaatiliste meetodite kasutamist, mis ei mahu käesoleva raamatu piiridesse. Samuti pole võimalik käesolevas raamatus vaadelda üksikasjaliselt kõiki tähtsamaid siirdeprotsesside liike. Seepärast piirdume siin peamiselt järsu lühise puhul esinevate siirdeprotsesside vaatlusega ning ka seda peamiselt füüsikalisest seisukohast.

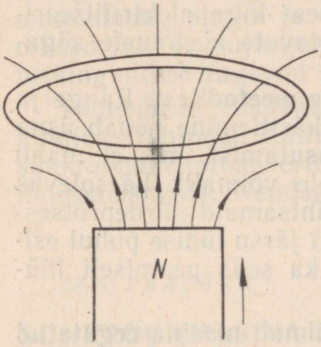
Järsu lühise all mõistame lühist, mis toimub masina ergutatud või pingestatud olekus ankruklemmidelt väljuvate juhtmete ühendamisel (atmosfäärilisest elektrist tingitud lahendus, isolatsiooni vigastus, valelülitus jne.). Sellise lühisega, vastupidiselt ülalvaadeldud püsivatele ehk statsionaarsetele lühistele, kaasnevad intensiivsed siirdeprotsessid. Järsk lühis on üks tähtsamaid sünkroonmasina siirdeprotsesside liike ning selle juures esinevad nähtused iseloomustavad suurel määral ka teisi sünkroonmasinate siirdeprotsesse.

Igasuguste siirdeprotsesside juures esinevad tavaliselt teatavate suuruste (voolude, jõudude, kiiruste jne.) tõuked ja võnkumised, mis edasiselt enamikul juhtudel sumbuvad. Sumbuvus on tingitud energia hajumisest süsteemi teatud osades (mehaaniliste võnkumiste puhul hõõrduvatel pindadel, elektriliste siirdeprotsesside puhul elektrilistes takistustes jne.). Energia hajumine ei toimu hetkeliselt, vaid nõuab teatud aega. Mida intensiivsem on energia hajumine, seda kiiremini toimuvad siirdeprotsessid.

Mainitud põhjustel võib siirdeprotsessi lühikese algperioodi uurimisel energia hajumist mitte arvestada, mis paljudel juhtumitel ka tublisti lihtsustab ülesande lahendamist, võimaldades palju kergemini määrata protsessi esialgseid suurusi. Olles need selgitanud, on võimalik hiljem arvesse võtta ka protsessi sumbuvust. Sellist võtet kasutame ka järsu lühise uurimisel. Kuna energia hajumine ja sumbuvus elektriahelates on tingitud aktiivtakistustest, siis sumbuvuse esialgsel mittearvestamisel tuleb need

takistused lugeda võrdseteks nulliga. Seega vooluahelad on ülijuhtivad, ülijuhtivates vooluahelates aga ei toimu energia hajumist.

Vastavalt ülaltoodule oletame, et sünkroonmasina ankur ja induktori vooluahelad on järsu lühise alghetkel ülijuhtivad ($r = 0$). Enne kui asuda vastavate protsesside uurimisele, tutvume veel ühe ülijuhtivate vooluahelate puhul esineva nähtusega. Tõestame nimelt, et ülijuhtiva vooluahela magnetiline aheldusvoog ei muutu ja säilitab alati kindlat väärtust, mis eksisteeris ülijuhtiva vooluahela moodustumisel.



Joon. 35-1. Ülijuhtiva vooluahela omaduste selgitamiseks

Ülijuhtiva vooluahela aheldusvoo konstantsuse teoreem. Olgu meil mingisugune väikese aktiivtakistusega suletud vooluahel (joon. 35-1), milles esialgu vool puudub ning aheldusvoog on null. Toome nüüd sellise ahela lähedusse magneti. Lenzi juhise alusel tekib siis ahelas vool, mis kutsub esile vastusuunalise magnetvälja ja tõkestab magneti voo tungimist ahela kontuuri. Mida väiksem on ahela takistus, seda tugevam on temas indutseeritud vool ning seda kauem ta püsib ning seda kauem takistab ta magnetvoo tungimist ahela kontuuri. On aga vooluahel ülijuhtiv, siis magneti voog ei saa temaga üldse ahelduda.

Öeldut võib tõestada ka matemaatiliselt. Olgu ahela endavoolu i poolt tekitatud aheldusvoog Ψ_e ning välise voo poolt ahelaga moodustatud aheldusvoog Ψ_v ning ahela takistus r. Teine Kirchhoffi seadus ahela kohta omab siis kuju:

$$-\left(\frac{d\Psi_v}{dt}+\frac{d\Psi_e}{dt}\right)=ir,$$

kus vasakul poolel esineb aheldusvoogude ajalisel muutusel ahelas indutseeritav emj. Kui $r = 0$, siis

$$\frac{d\Psi_v}{dt}+\frac{d\Psi_e}{dt}=0,$$

s. o. aheldusvoogude muutus on null ning aheldusvoogude summa

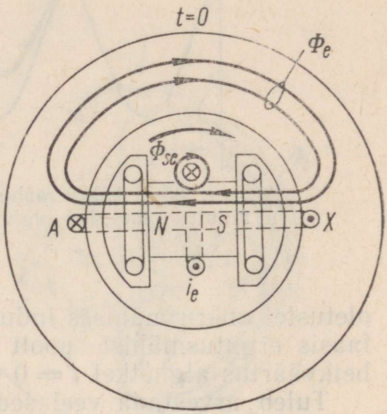
$$\Psi_v+\Psi_e=\text{const}.$$

Seega $r = 0$ puhul jääb ahela summaarne aheldusvoog alati konstantseks.

35-2. KOLMEFAASILINE JÄRSK LÜHIS ÜLIJUHTIVATE AHELATE PUHUL

Oletame, et tühijooksul töötava ergutatud sünkroongeneraatori klemmidel toimub kolmefaasiline järsk lühis, kusjuures protsessi jälgime ankru mähise ühes faasis, näit. faasis A. Et antud mähise faasis esinevad lühisvoolud oluliselt sõltuvad lühise alghetkel temaga aheldatud voost, siis vaatleme eraldi kahte tähtsamat erijuhtu: 1) kui alghetkel aheldusvoog on null ja 2) kui alghetkel aheldusvoog on maksimaalne.

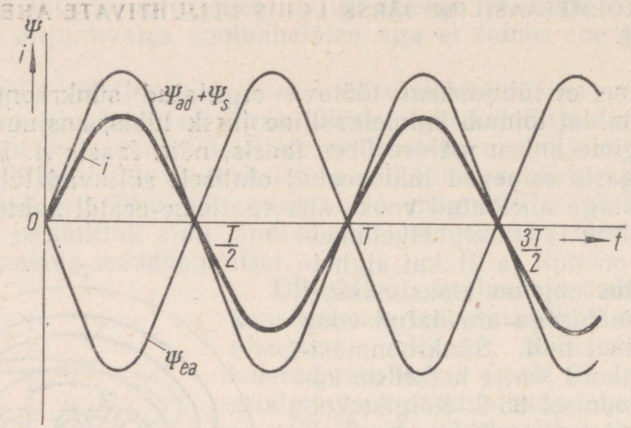
Faasimähisega aheldatud voog on alghetkel null. Sünkroonmasina algolukord lühise hetkel on kujutatud joonisel 35-2. Kõigist kolmest faasist on näidatud ainult faas A (keerd A-X), kusjuures ergutusvoog (Φ_e) ei ole faasiga A aheldatud. Ergutusmähis on samuti kujutatud ühekeerulisena, kusjuures temal esineb ka puistevoog Φ_{se}, mis moodustab ergutusmähise aheldusvoo $\Psi_{se} = \Phi_{se}$, kuna ergutusmähisel on ainult üks keerd. Pooluskingades on näidatud lühistatud keerdude näol summutusmähised. Lihtsuse mõttes on kõik mähised näidatud ühekeerulistena. Sellisel juhul mähiste aheldusvood Ψ on võrdsed neid mähiseid läbivate voogudega Φ.



Joon. 35-2. Sünkroongeneraatori magnetvood järsu lühise alghetkel ($t = 0$), kui alghetkel staatori faasi aheldusvoog on null

Oletame esialgu, et kõigi mähiste aktiivtakistused on võrdsed nulliga.

Lühise alghetkel ($t = 0$) on A-faasi vool null ning temaga pole aheldatud mingit magnetvoogu. Seega ka A-faasi aheldusvoog on alghetkel null ja kuna mähis on ülijuhtiv, siis ka järgmistel hetkedel peab tema aheldusvoog jääma nulliks. Järgnevalt rootor pöördub edasi ning ergutusvoog aheldub A-faasiga. Et aga viimase üldine aheldusvoog peab jääma nulliks, siis tekib A-faasis selline vool ning vastavalt ankrureaktsiooni- ja puistevoog (Φ_{ad}, Φ_s), et resulteeriv faasi aheldusvoog jääb nulliks. Seega ankru voolu poolt tekitatud endainduktsiooni aheldusvoog $\Psi_{ad} + \Psi_s = \Phi_{ad} + \Phi_s$ on võrdne, kuid vastusuunaline ergutusvoolu poolt tekitatud A-faasi aheldusvooga $\Psi_{oa} = \Phi_{oa}$. Rootori pöörlemisel see põhjustab ankru mähise siinuseliselt muutuva aheldusvoo Φ_{oa} (joon. 35-3). Vastavalt ka ankru mähise enda aheldusvoog $\Phi_{ad} + \Phi_s$ ning teda tekitav ankru vool i muutuvad samuti siinuseliselt (joon. 35-3). Vool i ongi järsu lühise puhul võetud



Joon. 35-3. Ankru mähise aheldusvoogude ja voolu ajaline muutus juhul, kui alghetkel staatori faasi aheldusvoog on null

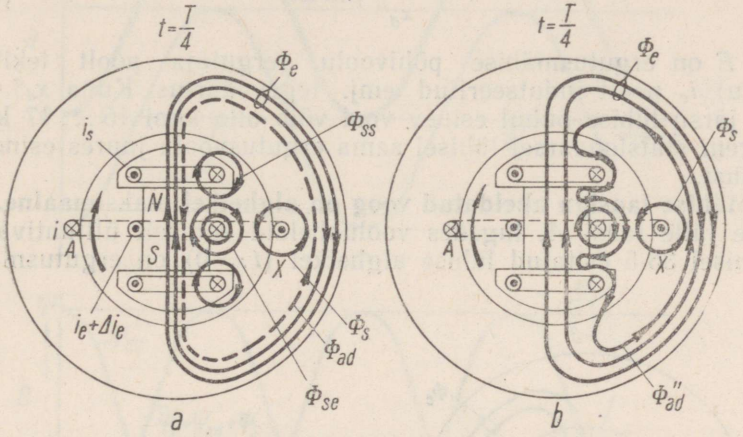
oletustel ankru mähises indutseeritud vool. Ta on ajaliselt vastasfaasis ergutusmähise poolt tekitatud aheldusvooga ning tema hetkväärtus alghetkel $t = 0$ on null.

Tuleb arvestada veel seda, et lühisel tekkiv ankrureaktsiooni voog Φ_{ad} pöörleb sünkroonselt rootoriga ja mõjutab viimast lahtimagneetivalt, püüdes vähendada pooluseid läbivat voogu. Voog Φ_{ad} kasvab nullväärtusest hetkel $t = 0$ kuni maksimaalse väärtuseni veerand perioodi $\left(\frac{T}{4}\right)$ vältel, tungides poolustesse. Ergutusmähis on aga samuti ülijuhtiv ning tema aheldusvoog ei saa muutuda. Seepärast tekib ergutusmähises lisavool Δi_e, mis suurendab pooluste voogu sedavõrd, et ergutusmähise üldine aheldusvoog jääb endiseks. Ankrureaktsiooni voog tungib ka summutusmähisesse ning põhjustab seal voolu i_s, mille poolt tekitatud voog tegutseb ankru voole vastu ja püüab säilitada summutusmähise esialgset aheldusvoogu, mis oli tingitud ergutusvoost. Voolud Δi_e ja i_s kujunevad seega sellisteks, et tulemusena rootori mähiste aheldusvood ei muutuks. Seejuures tuleb aga silmas pidada, et vooludest Δi_e ja i_s põhjustatud vood püüavad omakorda tungida staatorisse, mille toimel staatori vool tugevneb, kuid just selliseks, et A-faasiga aheldatud voog jääks ikkagi nulliks.

Nagu näeme, tekib järsu lühise puhul keeruline vastastikuse induktsiooni protsess staatori ja rootori mähiste vahel, mis omavahel on vastuinduktiivselt seotud nagu kolme mähisega trafo mähisedki.

Lühise algusest veerandi perioodi võrra hiljem kujunevad mähiste vood ligikaudu sellisteks, nagu on näidatud joonisel 35-4, *a*. Ankru mähise poolt tekitatud pooluseid läbiv voog Φ_{ad} on

näidatud punktiirjoonega, tema puistevoog Φ_s aga täisjoonega. Ergutusvoo suurenemine on tinglikult kujutatud ainult puistevoo Φ_{se} suurenemisena (vrd. joon. 35-2). Summutusmähise poolt tekitatud voog on samuti tinglikult näidatud puistevoona Φ_{ss}. Tegelikult ergutus- ja summutusmähise voolude Δi_e ja i_s poolt luuakse ka vood, mis tungivad läbi staatori, ning joonise 35-4, *a* kohaselt tuleb seda tõlgitseda nii, et need vood on hävitatud vastassuunas kulgeva ankrureaktsiooni voo Φ_{ad} poolt, mida joonisel 35-4, *a* pole samuti esitatud.



Joon. 35-4. Sünkroongeneraatori magnetvood ja voolud veerandi perioodi möödumisel järsu lühise alghetkest, mil staatori faasi aheldusvoog on null

Tegelikult pooluste südamikes samaaegselt vastassuunalisi vooge, nagu joonisel 35-4, *a* on kujutatud, esineda ei saa ning seepärast kujuneb voogude pilt selliseks, nagu on toodud joonisel 35-4, *b*. Jooniste 35-4, *a* ja 35-4, *b* võrdlemisel selgub, et kõigi mähiste aheldusvood on samasugused nagu lühise alghetkelgi (joon. 35-2). Ülijuhtivate ahelate puhul joonisel 35-4, *b* esitatud väljapilt lühise edasisel kulgemisel enam ei muutu.

Nagu selgus ülal ning võib näha ka jooniselt 35-4, *b*, on järsu lühise puhul ankrureaktsiooni voog osaliselt hävitatud ergutus- ja summutusmähise lisavoolude poolt, osaliselt aga tõrjutakse rootori mähiste puistevoogude teekondadele (vt. joon. 35-4, *b*), mis omavad suuri magnetilisi takistusi. Selle tulemusena resulteeriv ankrureaktsiooni voog järsu lühise puhul Φ''_{ad} jääb nõrgaks, võrreldes statsionaarsetes režiimides sama voolu juures esineva vooga (Φ_{ad}). Vastavalt sellele on järsu lühise puhul väiksem ka ankru mähise induktiivtakistus. Sellises faktis kajastub tegelikult

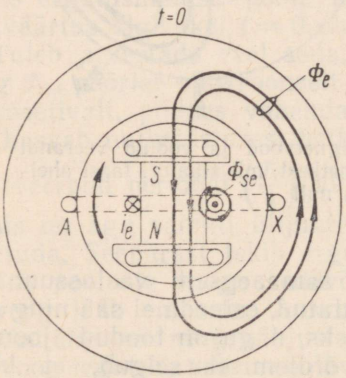
õigesti rootori mähiste lisavoolude ankrureaktsioonile vastutegutsev mõju. Pikitelje sünkroonse takistuse x_d asemel tuleb järsu lühise puhul arvestada ülimööduvat takistust x''_d, mis on määratud eelmises peatükis toodud valemiga (34-1) ning aseskeemiga joonisel 34-5, *a*. Viimane joonis kujutab masina kolme vastuinduktiivselt sidestatud mähise aseskeemi ning kajastab ka järsu lühise puhul nende mähiste vahel esinevaid vastastikuse induktsiooni protsesse.

Seega lühisvool ankru mähises

$$i = \frac{\sqrt{2}E}{x_d''} \sin \omega t, \qquad (35\text{-}1)$$

kus E on ergutusmähise põhivoolu (ergutaja poolt tekitatud voolu) i_e poolt indutseeritud emj. tegevväärtus. Kuna $x_d'' \ll x_d$, siis järsu lühise puhul esinev vool võib olla kuni 15 ... 17 korda suurem statsionaarsel lühisel sama ergutusvoolu juures esinevast voolust.

Mähise faasiga aheldatud voog on alghetkel maksimaalne. Jälgime jälle faasi A, lugedes vooluahelaid endiselt ülijuhtivateks. Joonisel 35-5 esitatud lühise alghetkel ($t = 0$) on ergutusmähise

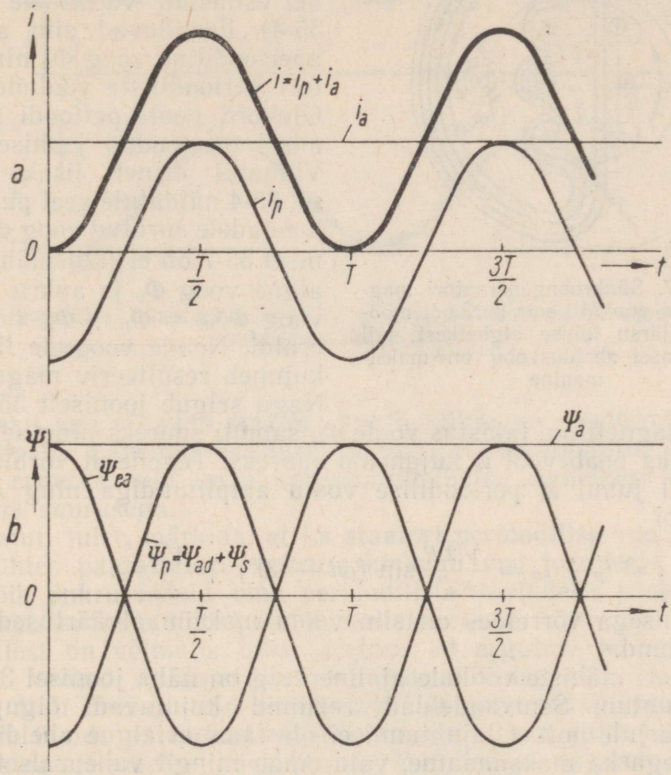


Joon. 35-5. Sünkroongeneraatori magnetvood järsu lühise alghetkel ($t = 0$), kui alghetkel staatori faasi aheldusvoog on maksimaalne

poolt tekitatud A-faasi aheldusvoog maksimaalne. Kuna mähis on ülijuhtiv, siis ta püüab säilitada protsessi edasisel kulgemisel selle aheldusvoo muutmatuna. Samal ajal muutub rootori pöörlemisel A-faasiga ahelduv ergutusvoog siinuseliselt ning selles suhtes olukord on samane nagu esimesena vaadeldud juhulgi. Vastavalt võib ankrus tekkivat voolu vaadelda koosnevana kahest komponendist. Üks nendest püüab säilitada esialgset aheldusvoogu ning on seepärast sisuliselt alalisvool, teine aga on nagu eelvaadeldud juhulgi siinuseline voolukomponent, mis kompenseerib ergutusmähise poolt tekitatud siinuseliselt muutuva ankrumähise

aheldusvoo. Nimetame esimest *ankru voolu komponendi aperioodiliseks* (i_a), teist aga *perioodiliseks* (i_p).

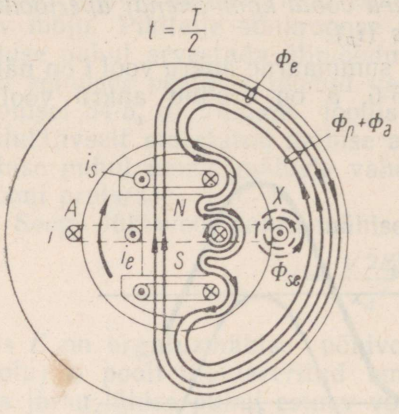
Mõlemad voolukomponendid ja summaarne ankru vool i on näidatud joonisel 35-6, *a*. Joonisel 35-6, *b* on toodud ankru voolu



Joon. 35-6. Sünkroongeneraatori ankru mähise faasivoolu komponendid (*a*) ja aheldusvood (*b*) sõltuvalt ajast järsu lühise puhul, kui selle faasiga aheldatud voog on lühise alghetkel maksimaalne.

mõlema komponendi poolt ankru mähise *A* faasis tekitatud aheldusvood Φ_a ja Φ_p ja samas mähises ergutusvoolu poolt tekitatud aheldusvoog Φ_{ea}. Viimaselt jooniselt on näha, et vaadeldavas olukorras resulteeriv aheldusvoog tõepoolest on konstantne ning võrdub ergutusmähise poolt tekitatud esialgse aheldusvooga.

Ankru mähise aperioodilise voolu poolt tekitatud aperioodiline voog Φ_a põhjustab omakorda rootori mähistes voolude tekkimise, mis takistavad aperioodilise voo Φ_a tungimist poolustesse ja mis



Joon. 35-7. Sünkroongeneraatori magnetvood ja voolud poole perioodi möödumisel järsu lühise alghetkest, mil staatori faasi aheldusvoog on maksimaalne

oma iseloomult on perioodilised. Vastavalt ka voog Φ_a osaliselt hävitatakse ning osaliselt surutakse rootori mähiste puisteteekondadele. Eelmistel juhtudel esinenud voogudele (joon. 35-4) lisanduvad siin staatori aperioodiline voog Φ_a ning rootori perioodiliste voolude vood. Olukord poole perioodi möödumisel on toodud joonisel 35-7. Viimasel esineb lisaks joonisel 35-4 näidatule veel puisteteekondadele surutud voog Φ_a. Joonisel 35-7 on ergutusmähise esialgne voog Φ_e ja ankru mähise voog $\Phi''_{ad} = \Phi_a + \Phi_p$ näidatud eraldi. Nende voogude liitmisel kujuneb resulteeriv magnetväli. Nagu selgub jooniselt 35-7, kujuneb magnetiline takistus voole Φ_a samuti suureks ning selle säilitamiseks peab vool i_a kujunema suureks. Tegelikult võrdub vaadeldaval juhul i_a perioodilise voolu amplituudiga ning A-faasi koguvool

$$i = i_p + i_a = \frac{\sqrt{2}E}{x_d''} \sin(\omega t - 90°) + \frac{\sqrt{2}E}{x_d''}. \qquad (35\text{-}2)$$

Eelmisega võrreldes on siin voolu maksimaalväärtused kahekordistunud.

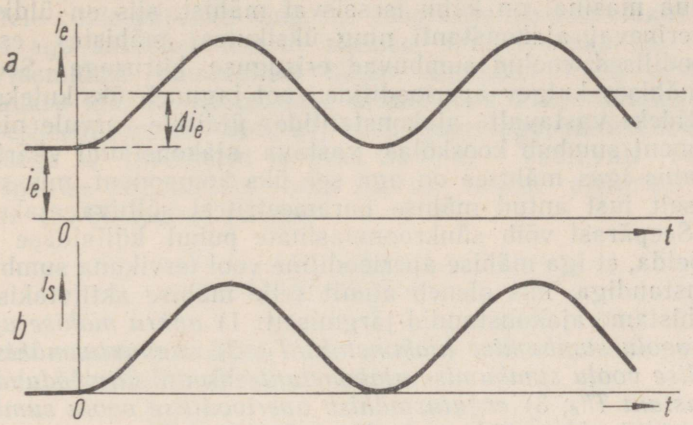
Rootori mähiste voolude ajaline kulg on näha joonisel 35-8.

Üldjuhtum. Senivaadeldud režiimid kujutavad õigupoolest kahte piirjuhtumit. Üldjuhtumil ei ole faasi esialgne aheldusvoog ei null ega ka maksimaalne, vaid omab mingit vahepealset väärtust. Järelikult on siis vahepealse suurusega ka ankru aperioodiline vool, samuti voog. Perioodiline vool aga jääb oma suuruselt alati endiseks, muutub ainult tema algfaas. Aperioodilise voolu suurus on alati niisugune, et ta koos perioodilise voolu algväärtusega moodustab alghetkel ($t = 0$) nulli. Seega võib üldjuhtumil ankru voolu jaoks kirjutada avaldise:

$$i = i_p + i_a = \frac{\sqrt{2}E}{x_d''} \sin(\omega t - \psi) + \frac{\sqrt{2}E}{x_d''} \sin\psi, \qquad (35\text{-}3)$$

kus ψ on algfaas (ψ on null, kui alghetkel faasiga aheldatud voog on null).

Kuna vaatleme kolmefaasilist järsku lühist, siis võib alghetkel aheldusvoog olla null ainult ühes faasis ja sedagi vaid üksikjuhtudel. Järelikult tuleb üldiselt arvestada seda, et alati esinevad ankrus aperioodilised voolukomponendid (vähemalt kahes faasis).



Joon. 35-8. Sünkroongeneraatori rootori mähiste voolude ajaline kulg järsu lühise korral

Enamasti aga võtavad staatori aperioodilise voo tekitamisest osa kõik faasid. Lähemal vaatlusel selgub, et aperioodiline voog on kindla ergutusvoolu korral sõltumatult lühise alghetkest alati ühe ja sama suurusega.

Samuti tuleb märkida, et ka staatori perioodilise voo ehk rootori suhtes paigalseisva ankrureaktsiooni voo loomisest võtavad osa kõik ankru faasid oma perioodiliste vooludega ning ka see jääb konstantseks sõltumata lühise alghetkest.

Sellest on võimalik teha järeldus, et ergutus- ja summutusmähise voolud sõltumata kolmefaasilise lühise alghetkest sisaldavad alati ühesuguseid aperioodilisi ja perioodilisi komponente.

Võib ütelda, et rootori mähiste aperioodilised voolud indutseerivad staatori mähise faasides perioodilised voolukomponendid ning staatori voolu aperioodilised komponendid indutseerivad rootori mähistes perioodilised komponendid.

35-3. JÄRSK LÜHIS REAALSES MASINAS

Kolmefaasiline lühis. Tegelikkuses omavad kõik masina mähised teatud aktiivtakistust, mistõttu vooluahelates salvestatud elektrienergia hajub soojusena. Seepärast esineb voolude sumbumine ning p. 35-2 saadud tulemused on õiged ainult lühise alghetkel. Edasi hakkavad vabad aperioodilised voolud, mille säilitamiseks välised elektromotoorsete jõudude allikad puuduvad, sumbuma ning koos nendega sumbuvad ka nende poolt indutseeritud voolud muudes ahelates. Iga voolu sumbumine toimub ajaliselt eksponentsiaalselt teatava kindla ajakonstandiga.

Kuna masinal on kolm iseseisvat mähist, siis on üldiselt ka kolm erinevat ajakonstanti ning üksikutes mähistes esinevad aperioodilised voolud sumbuvad erisuguse kiirusega. Seejuures igas mähises kulgev aperioodiline vool jaguneb üksikuteks komponentideks vastavalt ajakonstantide üldisele arvule ning iga komponent sumbub kooskõlas vastava ajakonstandi väärtusega. Ülekaalus igas mähises on aga see üks komponent, mis sumbub peamiselt just antud mähise parameetritest sõltuva ajakonstandiga. Seepärast võib sünkroonmasinate puhul küllaldase täpsusega öelda, et iga mähise aperioodiline vool tervikuna sumbub ühe ajakonstandiga, mis oleneb ainult selle mähise aktiivtakistusest.

Tähistame ajakonstandid järgmiselt: 1) *ankru mähise aperioodilise voolu sumbumise ajakonstant* T_a; 2) *summutusmähise aperioodilise voolu sumbumise ajakonstant* ehk nn. *ülimööduva voolu ajakonstant* T''_d; 3) *ergutusmähise aperioodilise voolu sumbumise ajakonstant*, ehk *mööduva voolu ajakonstant* T'_d.

Arvestades ankru mähise aperioodilise voolu sumbumist, saame valemi (35-3) teise liikme asemel järgmise seose:

$$i_a = \frac{\sqrt{2}E}{x_d''} \sin \psi \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{am} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin \psi, \qquad (35\text{-}4)$$

kus

$$I_{am} = \frac{\sqrt{2}E}{x_d''} \qquad (35\text{-}5)$$

on ankru mähise aperioodilise voolu tippväärtus.

Ankru perioodilise voolu indutseerimisest võtavad osa järgmised kolm induktori voolu: 1) summutusmähise aperioodiline vool, mis sumbub ajakonstandiga T''_d, 2) ergutusmähise aperioodilise iseloomuga lisavool Δi_e, mis sumbub ajakonstandiga T'_d, ning 3) ergutaja poolt tekitatud põhiergutusvool i_e, mis ei sumbu. Vastavalt jaguneb ka ankru perioodiline vool ise kolmeks komponendiks. Esimene komponent sumbub ajakonstandiga T''_d ja seda nimetatakse *ankru perioodilise voolu ülimööduvaks komponendiks* (i''_p), teine sumbub ajakonstandiga T_d ning teda nimetatakse sama voolu *mööduvaks komponendiks* (i'_p), kolmas aga ei sumbu ning kannab nimetust *ankru perioodilise voolu statsionaarne komponent* ($i_{p\infty}$), oma suuruselt vastab see lühisvoolule siirdeprotsessi lõppemisel. Määrame need kolm komponenti ning asendame nende kaudu avaldise (35-3) esimese liikme.

Ankru mähise perioodilise voolu tippväärtus (amplituud) on avaldise (35-3) kohaselt

$$I_{pm} = \frac{\sqrt{2}E}{x_d''}. \qquad (35\text{-}6)$$

Summutusmähise puudumisel induktori mähiste vastutoime ankrureaktsiooni voole nõrgeneb, ankrureaktsiooni voog pääseb

juba lühiseprotsessi algul läbi pooluskingade, magnetiline takistus sellele voole väheneb ning see voog kujuneb suuremaks. Tulemusena aga suureneb ankru mähise induktiivtakistus. Seega summutusmähise puudumisel lühise alghetkel tuleb arvestada mitte ankru mähise pikiteljelise ülimöödu va induktiivtakistusega x''_d (aseskeem joonisel 34-5, *a*), vaid suuremaga, nimelt mööduva takistusega x_d' (aseskeem joonisel 34-7, *a*). Vastavalt väheneb ankru mähise perioodilise voolu suurus lühise alghetkel ning avaldise (35-6) asemel saame:

$$I_{pm} = \frac{\sqrt{2}E}{x'_d}. \tag{35-7}$$

Järelikult summutusmähise mõju avaldub ankru mähise perioodilise voolu algamplituudi suurenemises

$$I''_{sm} = I''_{pm} - I'_{pm} = \sqrt{2}E\left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d}\right) \tag{35-8}$$

võrra. See vool ilmselt ongi indutseeritud summutusmähise aperioodilise voolukomponendi poolt, sumbub ülimööduva ajakonstandiga T''_d, nagu summutusmähise aperioodiline vool ise ning on ankru perioodilise voolu ülimööduvaks komponendiks.

Siirdeprotsesside lõppemisel jääb püsima statsionaarne lühisvool $i_{p\infty}$ amplituudiga

$$I_{pm} = \frac{\sqrt{2}E}{x'_d}. \tag{35-9}$$

Seega vahe

$$I'_{sm} = I'_{pm} - I_{pm} = \sqrt{2}E\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d}\right) \tag{35-10}$$

vastab ergutusmähise aperioodilise lisavoolu poolt indutseeritud mööduva voolukomponendi algamplituudile.

Ankru kogulühisvool

$$i = i_p + i_a = I''_{sm}e^{-\frac{t}{T''d}}\sin(\omega t - \psi) + I'_{sm}e^{-\frac{t}{T'd}}\sin(\omega t - \psi) +$$

$$+ I_{pm}\sin(\omega t - \psi) + I_{am}e^{-\frac{t}{T_a}}\sin\psi. \tag{35-11}$$

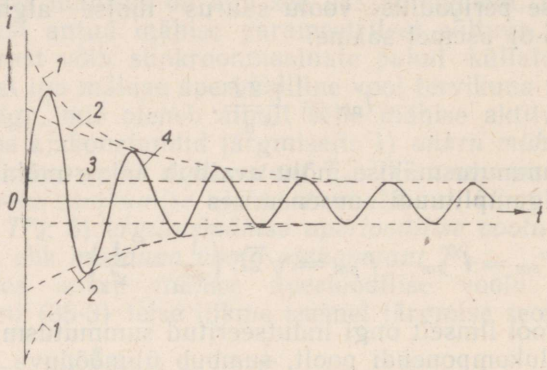
Summutusmähise puudumisel tuleb võtta

$$x''_d = x'_d.$$

Siis avaldise (35-8) põhjal

$$I''_{sm} = 0,$$

ülimööduv komponent seosest (35-11) kaob ning aperioodilise voolu algväärtus I_{am} valemi (35-5) kohaselt samuti väheneb. Siit selgub, et summutusmähistega varustatud sünkroonmasinate puuduseks on lühisvoolude suurenemine. Kuid selle puuduse teevad mitmekordselt tasa summutusmähiste eelised, eriti paralleeltöö parema stabiilsuse tagamine, mida lähemalt puudutame allpool.



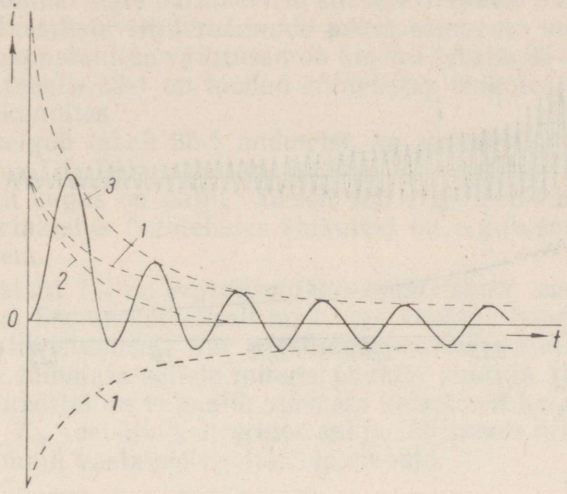
Joon. 35-9. Sünkroongeneraatori ankru mähise faasivoolu sõltuvus ajast järsu lühise korral aperioodilise voolukomponendi puudumisel

Ankru lühisvoolu ajaline kulg aperioodilise voolu puudumisel ($\psi = 0$) on toodud joonisel 35-9. Kõver *1* vastab voolu amplituude ühendavale kõverale, kõverate *1* ja *2* vahe moodustab voolu ülimööduva komponendi, kõverate *2* ja *3* vahe — voolu mööduva komponendi; kõver *3* vastab statsionaarsele lühisvoolule ning kõver *4* kujutab kogulühisvoolu.

Lühisvoolu ajaline kulg juhul, kui aperioodiline vool antud faasis on maksimaalne ($\psi = 90°$), selgub jooniselt 35-10. Kõver *1* kujutab perioodilist lühisvoolu komponenti ning vastab kõverale *4* joonisel 35-9, kõver *2* esitab aperioodilist voolu ja kõver *3* — kogulühisvoolu. Aperioodilise voolu mõjul koguvoolu kõver lühise algul tõuseb abstsisstelje suhtes ülespoole ning voolude sumbumisel laskub järk-järgult alla, kuni viimaks kujuneb statsionaarne olukord ja voolukõver muutub ajatelje suhtes sümmeetriliseks.

Joonistel 35-9 ja 35-10 toodud kõverad vastavad piirjuhtumitele. Praktikas esineb enamikul juhtudel vahepealne protsess, s. t. aperioodilise voolu algväärtus on nulli ja tippväärtuse mingi vahepealne suurus.

Lühisvoolu maksimaalset võimalikku hetkväärtust nimetatakse tõukelühisvooluks. Sumbuvuse puudumisel oleks ta võrdne kahekordse perioodilise voolukomponendi amplituudiga. Sumbuvuse tõttu aga tõukelühisvoolu suurus väheneb, sest voolu maksi-



Joon. 35-10. Sünkroongeneraatori ankru mähise faasivoolu sõltuvus ajast järsu lühise korral maksimaalse aperioodilise voolukomponendiga

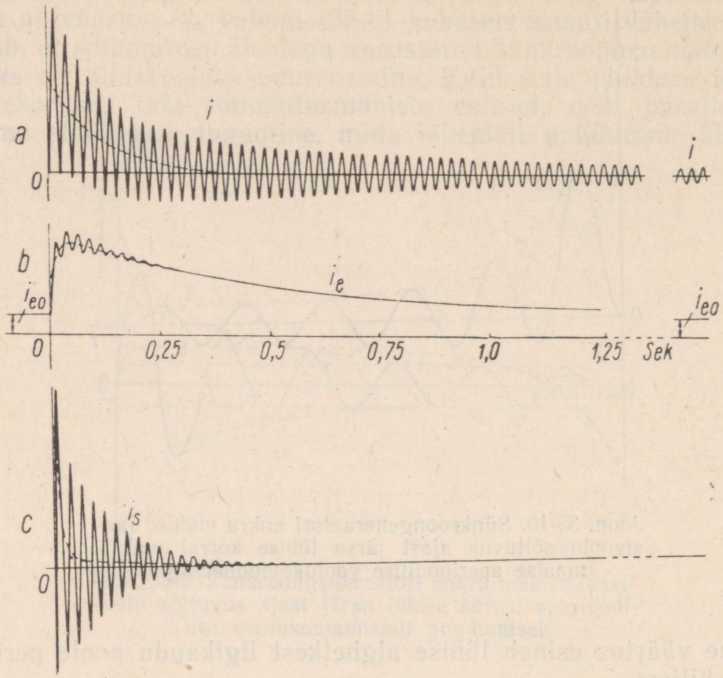
maalne väärtus esineb lühise alghetkest ligikaudu poole perioodi võrra hiljem.

Joonisel 35-11 on toodud voolude ostsillogrammid järsu lühise puhul.

Ergutus- ja summutusmähiste voolude sumbumisel nende vastutegutsev ehk ekraneeriv mõju ankrureaktsiooni voo suhtes väheneb ning viimane saab võimaluse tungida poolustesse. Selle voo väärtus ankru voolu ühiku kohta seega järk-järgult suureneb ning vastavalt ankru mähise induktiivtakistus kasvab väärtusest x_d'' kuni pikiteljelise sünkroonse takistuse väärtuseni x_d. Ankru perioodilise voolu vähenemist lühise kestel võib seega tõlgitseda kui ankru induktiivtakistuse suurenemise tulemust. Siirdeprotsesside lõppedes ankrureaktsiooni voog on tervikuna tunginud poolustesse ja avaldab täiel määral oma lahtimagneetivat toimet.

Ühe- ja kahefaasiline järsk lühis. Ühe- ja kahefaasilise järsu lühise puhul toimuvad põhiliselt samasugused protsessid nagu kolmefaasilise lühise puhulgi ning esinevad ka samasugused voolukomponendid. Erinevused seisavad ainult selles, et perioodilised ankruvoolud omavad, nagu statsionaarse lühise puhulgi, päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponente. Pärijärgnevus-induktiivtakistusteks on ka ebasümmeetriliste järskude lühiste puhul x_d'', x_d' ja x_d, vastu- ja nulljärgnevustakistused on aga samasugused nagu statsionaarsetel lühistelgi, sest ka siis vastu- ja nulljärgnevusvood indutseerivad voole induktori mähistes.

Arvestades ülaltoodut võime ühe- ja kahefaasilise järsu lühise perioodiliste ankruvoolude algväärtuste avaldised saada avaldistest (34-18) ja (34-20), asendades seal x_d takistusega x_d'' (või x_d', kui summutusmähis puudub). Seega



Joon. 35-11. Sünkroongeneraatori mähiste voolude ostsillogrammid järsu lühise korral:
a — vool ankru mähises; *b* — vool ergutusmähises, *c* — vool summutusmähises

perioodiliste voolude amplituudide algväärtuste jaoks saame ühefaasilise lühise puhul:

$$I''_{pm1} = \frac{3\sqrt{2}E}{x''_d + x_2 + x_0}, \tag{35-12}$$

$$I'_{pm1} = \frac{3\sqrt{2}E}{x'_d + x_2 + x_0} \tag{35-13}$$

ja kahefaasilise lühise puhul:

$$I''_{pm2} = \frac{3\sqrt{2}E}{x''_d + x_2}, \tag{35-14}$$

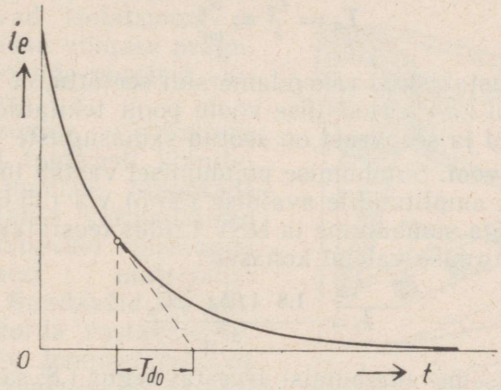
$$I'_{pm2} = \frac{3\sqrt{2}E}{x'_d + x_2}. \tag{35-15}$$

Mingit raskust ei tekita ka ühe- ja kahefaasilise lühise jaoks ankru kogulühisvoolu avaldiste kirjutamine analoogiliselt avaldistele (35-11). Siin vajalikud ajakonstandid T_d'' ebasümmeetriliste lühiste puhul on praktiliselt võrdsed. ajakonstandid T_d' aga erinevad ajakonstantide väärtustest kolmefaasilise lühise korral (vt. lähemalt allpool).

Sünkroonmasinate parameetrid siirderežiimides. Sümmeetriliste ehk kolmefaasiliste siirderežiimide puhul esinevate induktiivtakistuste ja ajakonstantide väärtused on toodud tabelis 35-1. Takistuste väärtused tabelis 35-1 on toodud suhtelistes ühikutes, ajakonstandid aga sekundites.

Nagu selgub tabeli 35-1 andmeist, on ajakonstant T_d'' märksa väiksem kui T_d'. Põhjuseks on asjaolu, et summutusmähise juhtmematerjali kogus on palju väiksem kui ergutusmähisel, mistõttu tema aktiivtakistus (suhtelistes ühikutes) on ergutusmähise omast palju suurem.

Ajakonstant T_{d0} on *ergutusmähise ajakonstant avatud ankruahela puhul.* See on katseliselt määratav vooluga koormatud ergutusmähise lühistamisel, kui ostsillografeerida voolu sumbumise kõver ning tõmmata sellele mingis punktis puutuja (joon. 35-12). Samal põhimõttel on võimalik määrata katseliselt ka ajakonstante T_d'', T_d' ja T_a, ostsillografeerides ankru lühisvoole ning eraldades ostsillogrammil vastavad voolukomponendid.



Joon. 35-12. Ajakonstandi T_{d0} määramine

Lühistatud ankrumähise puhul esinev ergutusmähise ajakonstant T_d' on ajakonstandist T_{d0} väiksem, sest lühistatud mähise juuresolekul antud mähise induktiivsus väheneb (võrdle transformaatori tühijooksu ja lühise takistusi). On võimalik tõestada, et

$$T_d' = \frac{x'_d}{x_d} T_{d0}. \qquad (35\text{-}16)$$

Mööduvate voolude ajakonstandid ühe- ja kahefaasiliste lühiste puhul:

$$T_{d1}' = \frac{x'_d + x_2 + x_0}{x_d + x_2 + x_0} T_{d0}, \qquad (35\text{-}17)$$

Masina tüüp	$x''_d{}^*$	$x'_d{}^*$
Turbogeneraatorid	0,11 ... 0,15	0,14 ... 0,25
Summutusmähistega hüdrogeneraatorid	0,13 ... 0,35	0,20 ... 0,50
Summutusmähisteta hüdrogeneraatorid	0,18 ... 0,40	0,20 ... 0,50
Sünkroonkompensaatorid	0,18 ... 0,40	0,30 ... 0,60

$$T_{d2}' = \frac{x'_d + x_2}{x_d + x_2} T_{d0}. \qquad (35\text{-}18)$$

Ankru mähise aperioodilise voolu ajakonstant on määratav vastujärgnevus-induktiivtakistuse või induktiivsuse ja ankru mähise aktiivtakistuse kaudu:

$$T_a = \frac{L_2}{r} = \frac{x_2}{\omega r}. \qquad (35\text{-}19)$$

Vastujärgnevustakistust rakendame siin seetõttu, et nii vastujärgnevusvoolu kui ka aperioodilise voolu poolt tekitatud vood rootori suhtes liiguvad ja seepärast on seotud samasuguste protsessidega.

Tõukelühisvool. Sumbumise puudumisel vastab tõukevool kahekordsele voolu amplituudile avaldise (35-5) või (35-6) järgi. Tegelikult esineb aga sumbumine ja NSV Liidus teostatakse tõukevoolu arvutamist järgmise valemi kohaselt:

$$I_t = \frac{1{,}8 \cdot 1{,}05 \sqrt{2}\, U_n}{x''_d}. \qquad (35\text{-}20)$$

Siin esineb 2 asemel sumbumist arvestav tegur 1,8; samal ajal tegur 1,05 on tingitud asjaolust, et standardi ГОСТ 183-55 kohaselt on lubatud masinate töötamine pingel 1,05 U_n.

Tõukevoolu kordsus nimivoolu suhtes

$$I_t{}^* = \frac{I_t}{\sqrt{2}\, I_n} = \frac{1{,}8 \cdot 1{,}05}{x''_d{}^*}. \qquad (35\text{-}21)$$

Tõukevoolu kordsus summutusmähistega masinatel ulatub kuni 15 ... 17,5 ning on seega küllaltki suur.

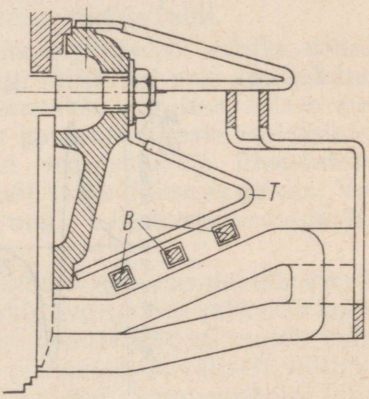
35-4. LÜHISVOOLUDE TOIME

Mehaanilised jõud. Mähiste juhtmetele mõjuvad mehaanilised jõud on võrdelised voolu ruuduga ning järsu lühise puhul kujunevad väga tugevateks. Uuretes on juhtmed tavaliselt hästi kinnita-

Tabel 35-1

T''_d sec	T'_d sec	T_{d0} sec	T_a sec
0,05...0,20	0,4...1,6	2,8...12	0,04...0,40
0,01...0,05	0,5...3,3	1,5...12	0,03...0,25
—	0,5...3,3	1,5...12	0,1...0,5
0,02...0,05	1,2...2,8	6,0...12	0,1...0,3

tud, kuid lauposade kinnitamine on raskem ning lühistel tekkivad jõud võivad osutuda eriti neile ohtlikeks. Lauposadele mõjuvad jõud püüavad staatori mähise lauposi painutada läbimõõdu suurenemise suunas, lähemale staatori rauapakile. Samal ajal toimivad jõud ka üksikute poolide ja faasigruppide lauposade vahel. Korduvad lauposade deformatsioonid lühiste puhul nõrgendavad isolatsiooni ja võivad tuua kaasa viimase pragunemise, eriti poolide uuretest väljumise kohtades.



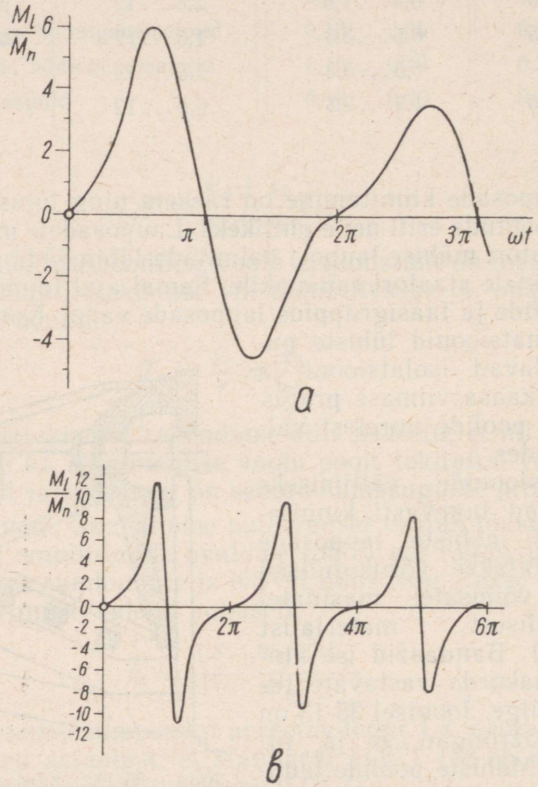
Joon. 35-13. Sünkroongeneraatori ankru mähise lauposade kinnitus

Deformatsioonide vältimiseks tuleb lauposad tugevasti kinnitada. Staatori mähiste lauposade peale paigutatakse võrukujulised bandaažid, võimsatel masinatel mittemagnetilisest materjalist (pronks jne.). Bandaažid ise kinnitatakse omakorda vastavate tugidetailide külge. Joonisel 35-13 on näha bandaažrõngad *B* ja tugidetailid *T*. Mähiste poolide lauposad kinnitatakse üksteisega isoleermaterjalist vaheklotside abil ning poolid seotakse klotside külge tugeva nööriga.

Lühisvoolude soojuslik toime aga ei ole suur, sest nende kestus on harilikult lühike.

Mehaanilised pöördemomendid. Perioodilised voolud kolmefaasilise lühise puhul ei tekita kuigi suurt pöördemomenti voolude reaktiivsuse tõttu. Kuid staatori mähise aperioodilise voo ning ergutus- ja summutusmähise voogude vastastikusel toimel tekivad tugevad perioodilised momendid, sest need vood liiguvad üksteise suhtes. Veelgi suuremad perioodilised momendid esinevad kahefaasilisel lühisel, sest siis nad tekivad ka staatori vastujärgnevusvoo ja induktori voo vastastikusel toimel.

Joonisel 35-14, *a* on toodud näitena võimsa sünkroonmasina pöördemomendi kõver sõltuvalt ajast kolmefaasilise järsu lühise puhul ning joonisel 35-14, *b* ühefaasilise järsu lühise puhul. Joonistel on pidurdavad momendid positiivsed.



Joon. 35-14. Sünkroongeneraatori pöördemoment sõltuvalt ajast kolmefaasilise (*a*) ja ühefaasilise (*b*) järsu lühise korral

Kõne all olevad momendid mõjuvad nii staatorile kui ka rootorile, ületades mitmekordselt nimimomenti, mida peab arvestama juba masinate projekteerimisel.

Kui järsk lühis toimub tühijooksul töötava masina klemmidel, siis pöörlemiskiirus väheneb, sest kadude tõttu mähistes keskmine moment pole null ning mõjub pidurdavalt. Lühise alghetkel kiirus langeb ka energia salvestumise tõttu magnetväljades. Kui lühis toimub aga koormatud masina klemmidel, siis pöörlemiskiirus kasvab, sest koormus langeb ära (kolmefaasilise lühise puhul) või

tublisti väheneb (mittesümmeetriliste lühiste puhul) ning jõumasina moment jääb pidurdavatest momentidest suuremaks.

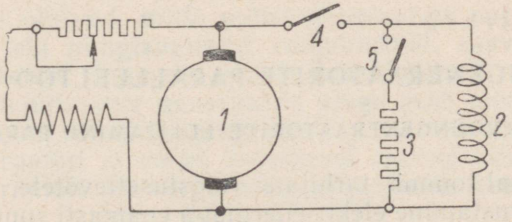
Sisemised lühised ja magnetvälja kaotamine. Seni vaatlesime väljaspool masinat toimuvaid lühiseid. Ankru mähise isolatsiooni vigastumiste puhul aga tekivad sisemised lühised, mis haaravad suurema või väiksema osa mähise keerdudest.

Sisemiste lühiste puhul kujunevad voolud veelgi suurematekskui väliste lühiste puhul, sest indutseeritud emj. väheneb võrdeliselt keerdude arvuga, induktiivtakistus aga võrdeliselt keerdude arvu ruuduga, s. o. kiiremini kui emj. Sisemised lühised on seega väga ohtlikud. Tavaliselt lühistatud mähiseosa põleb ruttu läbi, eriti kui ta sisaldab vähe keerde, ning lühise puhul tekkiv kaar vigastab tugevasti aktiivraua pakki.

Sünkroonmasinad varustatakse automaatsete kaitseseadmetega, mis sisemiste vigastuste puhul eraldavad masina võrgust. Kuid sisemise avarii kahjulik toime lakkab ainult siis, kui hävitatakse ehk kustutatakse ka ergutusmagnetväli. Sel eesmärgil suuremad masinad varustatakse nn. *väljakustutusautomaadiga*, mis rakendub tööle kaitseseadmeilt saadava impulsi abil.

Välja kustutamiseks on vaja muuta ergutusvool nulliks. Otsene ergutusvooluahela katkestamine mingi lüliti abil pole aga lubatav, sest kiirel voo vähenemisel indutseeritakse ergutusmähises suur emj., mis võib vigastada mähise ja kontaktrõngaste isolatsiooni. Ülesanne lahendatakse selliselt, et ergutusmähis ühendatakse *väljakustutustakistiga* ning järgnevalt lahutatakse ergutaja. Vastavate ümberlülituste teostamine ongi väljakustutusautomaadi ülesandeks.

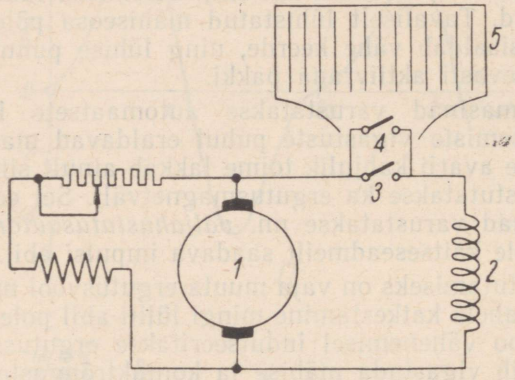
Väljakustutustakisti koos ergutusmähisega moodustab kinnise ahela, milles ergutusvool sumbub. Takistuse suurus valitakse kompromissina nii, et vool ahelas sumbuks võimalikult kiiremini, indutseeruv emj. aga jääks lubatavatesse piiridesse. Tavaliselt valitakse väljakustutustakistus 7 ... 12 korda suurem ergutusmähise enda takistusest ning arvestatakse voolu lühiajalise kestusega.



Joon. 35-15. Tavaline sünkroonmasina ergutusmagnetvälja kustutamise skeem:
1 — ergutaja ankur; *2* — sünkroonmasina ergutusmähis; *3* — väljakustutustakistus; *4*, *5* — väljakustutusautomaadi kontaktid

Joonisel 35-15 on esitatud tavaline NSV Liidus kasutatav välja kustutamise skeem. Normaalses tööolukorras on kontaktid *4* suletud, *5* aga avatud. Avarii puhul kaitseseadmed käivitavad väljakustutusautomaadi, mispuhul kontaktid *5* sulguvad ja kontaktid *4* avanevad.

Väljakustutusautomaadi kontaktid töötavad raskeis tingimusis, sest tekkiv kaar mõjub tugevasti kontakte kahjustavalt. Seepärast viimasel ajal on näiteks tehas «Elektrosila» kasutusele võtnud automaadi (joon. 35-16), millel väljakustutustakisti puudub ja



Joon. 35-16. Väljakustutusautomaat kaare kustutamise restiga:
1 — ergutaja ankur; *2* — sünkroongeneraatori ergutusmähis; *3* — automaadi peakontaktid; *4* — kaare kustutamise kontaktid; *5* — kaare kustutamise rest

ergutusmagnetvälja energia hajutatakse erilise konstruktsiooniga automaadi kaare kustutamise restil, millele kaar puhutakse elektrodünaamiliste jõudude toimel.

XXXVI PEATÜKK

SÜNKROONGENERAATORITE PARALLEELTÖÖ

36-1. SÜNKROONGENERAATORITE LÜLITAMINE PARALLEELTÖÖLE

Tänapäeval toimub tarbijate (tööstusettevõtete, linnade, asulate jne.) varustamine elektrienergiaga enamasti suurema või väiksema võimsusega energiasüsteemist. Viimases töötab paralleelselt, s. o. ühendatult ühisesse elektrivõrku, rida elektrijaamu. Igas elektrijaamas on omakorda tavaliselt installeeritud teatud hulk kolmefaasilisi sünkroongeneraatoreid, mis samuti omavahel töötavad paralleelselt. Tänapäeva suurimate energiasüsteemide võim-

sus küünib 10 . . . 20 miljoni kilovatini ning nendes töötab paralleelselt väga suur hulk sünkroongeneraatoreid. Ka isoleeritud elektrijaamas, mis toidab väiksemat tarbijate piirkonda, rakendatakse tavaliselt tööle mitu sünkroongeneraatorit.

Sünkroongeneraatorite paralleeltöö vajadus on tingitud eeskätt majanduslikest põhjustest. Võimsa energiasüsteemi koormusgraafik, s. o. tarbimisvõimsuse sõltuvus ajast, on ühtlasem ning koormustippude katmiseks vajalik generaatorite võimsus suhteliselt väiksem. Väiksem on ka vajalik avariireserv, mida tuleb rakendada tööle üksikute generaatorite rikete puhul. Võimsates energiasüsteemides on võimalik kasutada võimsaid generaatoreid, mis tehniliselt on täiuslikumad ning omavad suuremat kasutegurit. Ka on neil võimsusühiku maksumus ja ekspluatatsioonikulud väiksemad. Võimsates energiasüsteemides on tarbijate pidev elektrienergiaga varustamine paremini kindlustatud ning energia omahind väiksem.

Ühtse elektrivõrgu normaalse tööolukorra tagamiseks on vajalik, et kõik paralleelselt töötavad sünkroongeneraatorid annaksid võrku täpselt ühe ja sama sagedusega voolu, s. o. töötaksid sünkroonselt. Seega peavad ka need generaatorid pöörlema täiesti ühesuguselt.

Korraliku sünkroongeneraatorite paralleeltöö tagamine on üheks tähtsaimaks ülesandeks energiasüsteemides. Vastutusrikkaks ja teatava määrani keerukaks operatsiooniks on ka sünkroongeneraatori lülitamine paralleeltööle teiste generaatoritega. Järgnevalt vaatlemegi viimast küsimust lähemalt.

Sünkroniseerimise tingimused. Generaatori lülitamine töötavasse elektrivõrku peab toimuma nii, et võrgus ei tekiks tõsiselt häirivaid ja ka generaatorile endale ohtlikke voolutõukeid. Sellega seoses on vajalik paralleeltööle lülitatava generaatori töörežiim tühijooksul eelnevalt vajalikul viisil välja reguleerida, kindlaks teha sobiv generaatori võrkulülitamise hetk ning lõpuks teostada sisselülitamine. Selliste operatsioonide kogumit tervikuna nimetataksegi *sünkroniseerimiseks*.

Ideaalne olukord, mille puhul generaatori paralleeltööle lülitamisel ei teki mingisuguseid voolutõukeid, saavutatakse sisselülitamise hetkel järgmiste nõuete rahuldamisel:

1) juurdelülitatava generaatori pinge peab olema võrdne juba töötava masina või võrgu pingega;

2) generaatori ja võrgu sagedused peavad olema võrdsed;

3) generaatori ja võrgu faaside järjestus peab olema ühesugune;

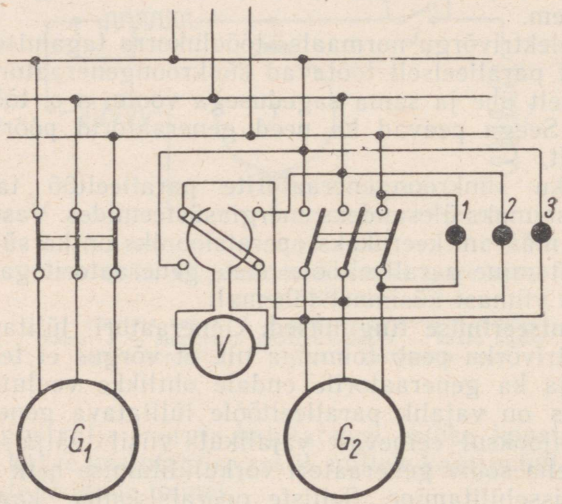
4) generaatori ja võrgu pingevektorid peavad olema faasis.

Praktikas leiavad kasutamist mitmesugused sünkroniseerimise viisid, mille puhul ülalnimetatud tingimusi suuremal või vähemal määral rahuldatakse.

Faasijärjestust on vaja kontrollida ainult generaatori esma-

kordsel sisselülitamisel antud võrku. Muidu tuleb aga kontrollida ainult kolme suurust: pinget, sagedust ja faasi. Pingete võrdsust, mida saavutatakse generaatori ergutusvoolu reguleerimise teel, kontrollitakse kas ümberlülitatava või kahe mõõtesüsteemiga voltmeetri abil. Generaatori sageduse ja faasi muutmist saavutatakse jõumasina pöörlemiskiiruse muutmisega. Pingete faasisolekut kontrollitakse kas faasilampide, nullvoltmeetri või sünkronoskoobi abil, automaatsetes sünkronisaatorites aga teostab seda vastav mõõteseade. Sagedusi on võimalik kontrollida ümberlülitatava või kahte mõõtesüsteemi omava sagedusmõõtja abil, kuid sageduste võrdsust võimaldavad kindlaks teha ka pingete faasisolekut kontrollivad seadmed.

Sünkroniseerimine faasilampide abil. Kasutatakse kahte lampide lülitamise viisi: 1) *pimelülitust* ja 2) *segalülitust.*

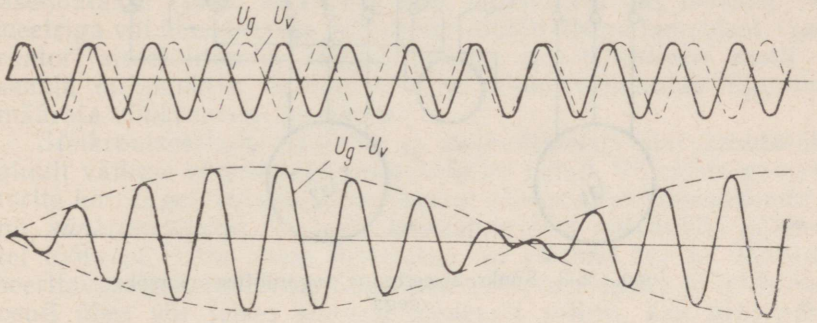


Joon. 36-1. Sünkroniseerimine pimelülituses lampidega

Pimelülituse skeem on esitatud joonisel 36-1. Vasakul on juba töötav generaator G_1, mille abiseadmeid pole näidatud, paremal aga sisselülitatav generaator G_2 koos kolme faasilambiga *1, 2, 3* ja ümberlülitatava voltmeetriga. Iga lamp on ühendatud vastava lüliti ühe faasi kahe kontaktiga. Kui ülaltoodud neli nõuet on rahuldatud, siis on kõigi kolme lüliti kontaktpaaride vahelised pinged, seega ka lampidele antavad pinged võrdsed nulliga. Lambid on siis üheaegselt pidevalt kustunud, mis tähistabki õiget lüliti rakendumise hetke.

Tegelikkuses on raske saavutada täpset generaatori ja võrgu sageduste võrdsust mingi pikema ajavahemiku vältel.

Joonisel 36-2, *a* on näidatud sisselülitatava generaatori pinge u_g ning võrgu pinge u_v kõverad, joon. 36-2, *b* aga lampidele mõjuva pinge $u_g - u_v$ kõver. Kuna pingete u_g ja u_v sagedused f_g ja f_v on veidi erinevad, siis pinge $u_g - u_v$ pulseerib sagedusega $f_g - f_v$, kusjuures sama sagedusega süttivad ja kustuvad ka faasilambid. Sagedus $f_g - f_v$ vastab joonisel 36-2, *b* punktiirkõvera

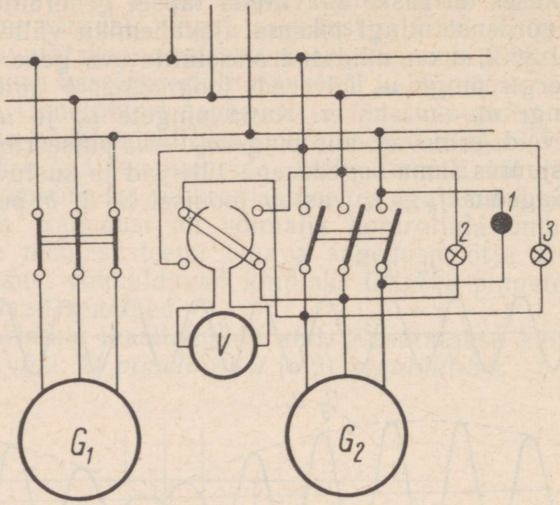


Joon. 36-2. Generaatori (u_g), võrgu (u_v) ja lampide ($u_g - u_v$) pingete muutus sõltuvalt ajast sageduste erinevuse puhul

sagedusele. Toimub lampide vilkumine suurema sagedusega, siis tähendab see suuremat generaatori ja võrgu sageduse erinevust ja ümberpöördult. Generaatori pöörlemiskiiruse reguleerimise ning samal ajal pingete võrdsuse kontrollimise teel saavutatakse olukord, kus lampide vilkumine toimub võimalikult väiksema sagedusega (vilkumise periood kuni üks sekund) ning seejärel generaatori sisselülitamine teostatakse hetkel, kui lambid on kustunud.

Segalülituse skeem on toodud joon. 36-3. Lamp *1* on ühendatud lüliti ühe ja sama faasi kontaktidele, lambid *2* ja *3* aga lüliti erinevate faaside kontaktidele. Sünkronismi saavutamisel on lamp *1* kustunud, lambid *2* ja *3* aga põlevad võrdse heledusega. Kui generaatori ja võrgu sagedused erinevad, siis lambid *1, 2, 3* kustuvad ja süttivad järjekorras erinevatel hetkedel. Lambid paigutatakse segalülituse puhul kilbile tavaliselt kolmnurkselt. Seejuures sageduste erinevuse puhul tekib pöörleva valguse efekt, kusjuures pöörlemise suund oleneb sellest, kas generaatori sagedus on võrgu sagedusest suurem või väiksem.

Kuna hõõglamp kustub varem kui tema pinge muutub nulliks, siis pimelülituse puhul on mõnevõrra raske määrata täpset sünkronismi momenti. Segalülituse puhul on sünkronismi momenti kergem määrata, sest siis lambid *2* ja *3* peavad põlema võrdsete heledustega. Pealegi on segalülituse puhul valguse pöörlemise



Joon. 36-3. Sünkroniseerimine segalülituses lampidega

suuna järgi võimalik kindlaks teha, millises suunas tuleb reguleerida generaatori pöörlemiskiirust sageduste võrdsustamiseks.

Kui sisselülitatava generaatori ja võrgu faaside järjestus ei ole sama, siis joonisel 36-1 esitatud lülituse puhul lambid ei sütti ega kustu enam üheaegselt, joonisel 36-2 esitatud lülituse puhul aga ümberpöördult, süttivad ja kustuvad üheaegselt. Sellisel korral on tarvis generaatori faaside järjestust muuta, milleks vahetatakse näiteks generaatori staatori klemmidel kaks juhet.

Tuleb märkida, et generaatori mittesünkroonne sisselülitamine võib põhjustada masina raskeid vigastusi. Oletame näiteks, et pimelülituse puhul (joon. 36-1) generaatori G_2 sisselülitamine toimub hetkel, mil lambid põlevad suurima heledusega. Lihtsuse mõttes võime oletada, et generaator G_1 töötab seejuures tühijooksul. Siis generaatorite G_1 ja G_2 staatori mähised moodustavad kinnise vooluahela, milles toimib mõlema generaatori elektromotoorsete jõudude summa, s. o. kahekordne pinge, mis sisselülitamise hetkel on rakendatud lüliti kontaktidele (samuti lampidele). Seega sisselülitamisel toimub vooluahela lühistamine, milles toimib kahekordne pinge ja kus ainsateks takistusteks on kahe generaatori takistused. Tulemusena tekib järsk lühis. Kui mõlemad generaatorid on täiesti ühesugused, siis tekkiv lühiseprotsess on täiesti ekvivalentne üksikult töötava generaatori järsu lühisega (vt. ptk. XXXV). Kui aga varem töötava generaatori nimivõimsus on sisselülitatava generaatori nimivõimsusest palju suurem, siis võib esimese takistust, võrreldes teisega, lugeda võrdseks nulliga. Niisugusel juhul

tekkiv lühiseprotsess on ekvivalentne üksikult töötava generaatori järsu lühisega kahekordsel pingel, mille tõttu esinevad kahekordsed tõukevoolud ning neljakordsed mehaanilised tõuke-pöördemomendid. Viimased võivad tekitada väga tõsiseid mähiste, võllide, pooluste ja kinnitusdetailide vigastusi. Samane olukord tekib ka generaatori ebaõigel sünkroniseerimisel võimsa võrgu puhul, kuna võrgu takistus, võrreldes sisselülitatava generaatori takistusega, võib olla väga väike.

Teised sünkroniseerimise viisid. *Nullvoltmeetri meetodi* puhul asendatakse (joon. 36-1) kas kõik lambid või üks nendest voltmeetriga või ühendatakse voltmeeter rööbiti ühega lampidest. Generaatori sisselülitamine toimub hetkel, mil voltmeetri osuti on skaala nullpunktis. Voltmeetri kasutamine võimaldab täpsemalt määrata sünkronismi momenti.

Sünkroniseerimist lampide ja nullvoltmeetri abil kasutatakse ainult väikese võimsusega generaatorite puhul. Võimsate generaatorite korral eelistatakse täiuslikumat sünkroniseerimisvahendit — nn. *sünkronoskoopi.* Viimane kujutab endast pöördvälja põhimõttel töötavat riista, mida toidetakse nii võrgust kui ka sünkroniseeritavast generaatorist. Sageduste erinevuse puhul pöörleb riista osuti ühes või teises suunas, olenevalt sellest, kas generaatori sagedus on võrgu sagedusest kõrgem või madalam, pöörlemiskiirus ise on aga võrdeline sageduste vahega. Sünkronismi saabumisel asetseb osuti vertikaalselt.

Kõrgepingegeneraatorite puhul lülitatakse sünkroniseerimisseadmed pingetrafode kaudu. Seejuures tuleb montaaži teostamisel hoolikalt kontrollida ka viimaste faasijärjestust.

Sünkroniseerimine on vastutusrikas operatsioon, mis nõuab valvepersonalilt eksimuste vältimiseks suurt tähelepanu. Eriti kehtib see avariide puhul, kui valvepersonal töötab pingelises ja närvilises olukorras. Samal ajal aga on vaja arendada maksimaalset operatiivsust mitmesuguste lülituste teostamisel, samuti ka reserv- või sünkronismist väljalangenud generaatorite sünkroniseerimisel. Eksimuste vältimiseks ja valvepersonali töökoormuse vähendamiseks on loodud ja kasutusele võetud mitmesuguseid *automaatseid sünkronisaatoreid.* Viimased reguleerivad automaatselt generaatori pinget ja sagedust vajalikus suunas ning vajalike tingimuste saavutamisel teostavad automaatse generaatori paralleeltööle sisselülitamise.

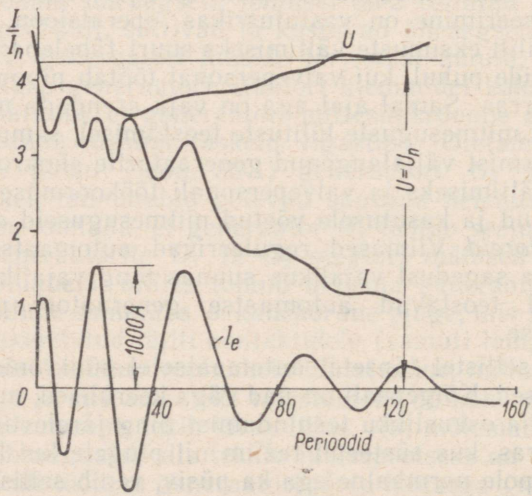
Kuid ka sellistel täpsetel automaatsetel sünkronisaatoritel on omad puudused. Kõigepealt on nad väga keerulised, mistõttu nõuavad pidevat ja oskuslikku teenindamist ning järelevalvet. Teiseks, avariiolukorras, kus süsteemi režiim nii pingete kui ka sageduste seisukohast pole normaalne ega ka püsiv, venib selliste automaatsete sünkronisaatorite kasutamisel sünkroniseerimisprotsess sageli pikaks (kuni 5 ... 10 ja isegi rohkem minutit), mis avarii likvideerimise seisukohast on äärmiselt ebasoovitav. Seepärast on

Nõukogude Liidus viimaste aastate vältel välja töötatud ja laialdaselt kasutamisele võetud sünkroongeneraatorite paralleeltööle lülitamine nn. *isesünkroniseerimise meetodil.*

Isesünkroniseerimise meetodi iseärasus seisab selles, et generaatori lülitamine võrku toimub ergutamata, s. o. pingevabas olekus. Seega langeb ära ka vajadus eelnevalt reguleerida generaatori pinge suurust, tema sagedust ja faasi, mis teiste viiside puhul on põhiliseks sünkroniseerimise protsessi osaks, nõuab palju aega ning on seotud eksimise võimalusega. Isesünkroniseerimise meetodi puhul on ainult soovitav, et generaatori pöörlemiskiirus sisselülitamise hetkel oleks võimalikult lähedane sünkroonsele kiirusele (erinevusega kuni 3%).

Generaatori lülitamisel võrku isesünkroniseerimise meetodil tekib generaatoris võrdlemisi tugev voolutõuge, nagu asünkroonmootori võrku lülitamiselgi. Kui ergutamata sünkroongeneraatori võrku lülitamine toimub sünkroonsel kiirusel ja egutusmähise lühistatud olekus, siis esinev protsess on täiesti ekvivalentne generaatori järsu lühisega (vt. ptk. XXXV). Ainus mitteoluline vahe seisab selles, et järsult lühistatavas ahelas toimib generaatoris ta enda ergutusvoolu poolt indutseeritava pinge asemel võrgu pinge. Kui võrgu takistus on võrreldes generaatori siirdetakistusega väike, siis ka tõukevool on samasugune kui järsu lühise puhul.

Kuigi generaatorite projekteerimisel ja ehitamisel arvestatakse seda, et nad peavad taluma järskude lühiste režiime, peetakse siiski



Joon. 36-4. Turbogeneraatori (100 MW) voolude sõltuvus ajast lülitamisel võrku isesünkroniseerimise meetodil

vajalikuks selliste režiimide esinemise sagedust võimalikult piirata, sest suured mehaanilised jõud ja nendega kaasuvad deformatsioonid kahjustavad mähiste isolatsiooni jne. Seepärast on isesünkroniseerimise meetodi puhul vaja voolutõukeid piirata. Voolutõuked oleksidki väikesed, kui oleks võimalik generaatori lülitamine võrku ergutusahela katkestatud olekus, sest siis oleks ergutusahela takistus lõpmata suur ja seega ka siirdetakistused (vt. p. 34-2) suured. Sel juhul aga järsult tekkiv ankrureaktsiooni voog indutseeriks ergutusmähises lubamatult kõrged pinged. Sellepärast suletakse ergutusmähise ahel väljakustutusseadme takistuse kaudu (vt. p. 35-4). Osaliselt muidugi voolutõukeid piirab ka võrgu enda (liinid, transformaatorid) takistus. Nõukogude Liidus kehtivate määruste kohaselt on isesünkroniseerimise meetodi kasutamine lubatud ainult siis, kui voolutõuge ei ületa 3,5-kordselt nimivoolu. Enamikel juhtumitel on see nõue rahuldatud ja isesünkroniseerimise meetodi rakendamine võimalik.

Kohe pärast generaatori lülitamist võrku isesünkroniseerimise meetodil lülitatakse ergutusmähisesse ergutusvool ning generaator sünkroniseerub.

Joonisel 36-4 on toodud 100-MW turbogeneraatori pinge U, voolu I ja ergutusvoolu I_e sõltuvus ajast isesünkroniseerimise protsessi vältel. Ordinaatteljel on märgitud nimipinge väärtus ja nimivoolu väärtus suhtelistes ühikutes.

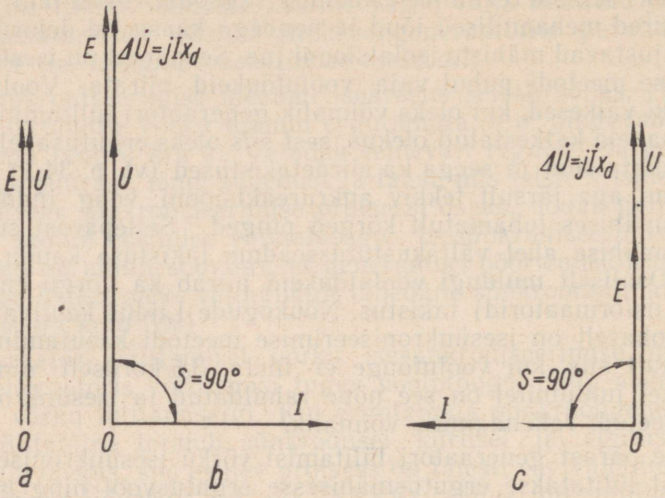
36-2. SÜNKROONMASINA PARALLEELTÖÖ SÜNKROONSED REŽIIMID

Reaktiivvõimsuse muutmine. Sünkroongeneraator, olles lülitatud paralleeltööle võrguga või teiste sünkroongeneraatoritega, töötab normaalselt viimastega sünkroonselt, s. o. generaatoris indutseeritava emj. sagedus on täpselt võrdne võrgupinge sagedusega. Järgnevalt tutvume lähemalt paralleeltöö sünkroonse režiimiga, kasutades seejuures vektordiagramme. Lihtsuse mõttes oletame, et tegemist on nähtamatute poolustega sünkroonmasinaga, kusjuures viimase ankrumähise aktiivtakistuse võtame võrdseks nulliga. Samuti oletame, et võrgus töötavate generaatorite võimsus on suur, võrreldes vaadeldava generaatori võimsusega, ning viimase töörežiimi muutus ei suuda seepärast muuta võrgu töörežiimi — s. o. tema pinget ja sagedust.

Täpselt teostatud sünkroniseerimise korral on generaatori ergutusmähise poolt indutseeritud emj. E võrdne võrgupingega U ja viimasega faasis (joon. 36-5, *a*). Nende vahe

$$\Delta \dot{U} = \dot{E} - \dot{U}$$

on siis võrdne nulliga ning masina ankru mähises ei teki mingit voolu.



Joon. 36-5. Sünkroongeneraatori vektordiagrammid paralleeltööl võrguga aktiivvõimsuse puudumisel

Oletame nüüd, et me suurendame masina ergutusvoolu. Siis emj. E muutub pingest U suuremaks, kuid ajaliselt on nad ikka faasis (joon. 36-5, *b*), sest generaatori ergutusvoolu muutmine ei mõjuta generaatori jõumasina töörežiimi ja seega ka pöördemomenti generaatori võllil, samuti viimase kiirust. Kuna võrgu ja generaatori klemmipinge U jääb muutumatuks, siis generaatoris peab tekkima sisemine voolust tingitud pingelang

$$\Delta\dot{U} = \dot{E} - \dot{U} = \mathrm{j}\dot{I}x_d, \qquad (36\text{-}1)$$

kus x_d on generaatori sünkroonne takistus. Voolu suurus on määratud pingelangu suurusega:

$$\dot{I} = \frac{\Delta\dot{U}}{\mathrm{j}x_d}. \qquad (36\text{-}2)$$

Et ahelas on puhtinduktiivne takistus x_d, siis on vool $\dot{I}$ pingelangust $\Delta\dot{U}$, samuti pingest $\dot{U}$ järel 90° võrra (joon. 36-5, *a*). Seega on generaator koormatud induktiivse vooluga, s. o. annab võrku induktiivset voolu ja reaktiivvõimsust, aktiivvõimsus aga on null.

Kui nüüd ergutusvoolu vähendada, siis E jääb pingest U väiksemaks, olles ikka viimasega ajaliselt faasis (joon. 36-5, *c*) ning pingelangu vektori

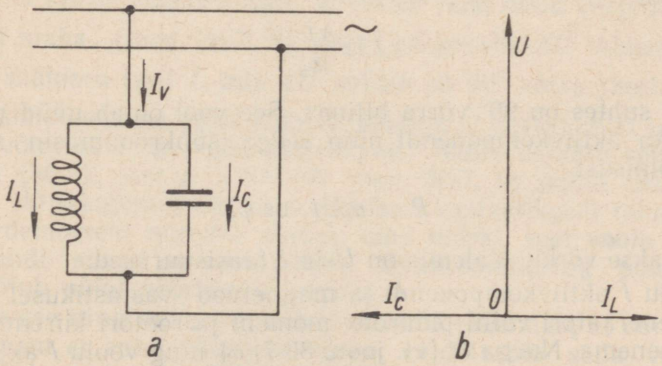
$$\Delta\dot{U} = \dot{E} - \dot{U}$$

suund osutub eelnevaga võrreldes vastupidiseks ning vastavalt muutub vastupidiseks ka vooluvektori suund. Nüüd on generaator koormatud mahtuvusliku vooluga, s. o. annab võrku mahtuvuslikku voolu. Sel puhul räägitakse, et ta tarbib võrgust reaktiivvõimsust.

Diagramme joonisel 36-5, *a* ja *b* võib tõlgitseda ka teisiti. Kui $E > U$, siis generaatoris tekib induktiivne vool, mille toimel tekkiv ankrureaktsiooni voog tegutseb generaatorit lahtimagneetivalt, vähendades masina üldist voogu ja seega ka tema elektromotoorset jõudu või pinget, nii et viimane saab võrdseks võrgu pingega. Ümberpöördult, kui $E < U$, siis tekib mahtuvuslik vool, mille magneetiva ankrureaktsiooni toimel üldine voog suureneb ja seega ka masina emj. või pinge suureneb, saades võrgu pingega võrdseks. Olgu märgitud, et masina klemmipinge ei saa erineda võrgupingest, sest mõlemad pinged mõõdetakse samade punktide vahel.

Selgitame siinkohal reaktiivsete voolude võrgust tarbimise ja võrku andmise mõisteid veel lähemalt.

Olgu lülitatud võrku rööbiti paispool ja kondensaator (joon. 36-6, *a*), kusjuures nad on valitud selliselt, et nende voolud on võrdsed: $I_C = I_L$. Et aga need voolud on nihutatud 180° võrra (joon. 36-6, *b*), siis võrgust tarbitav vool on null. Paispool tarbib seejuures ikkagi induktiivset voolu ja et võrgu vool on null, siis võib öelda, et kondensaator annab (toodab) induktiivset voolu, mille tarbijaks on paispool. Järelikult on täiesti samaväärsed väljendused, et kondensaator tarbib mahtuvuslikku voolu või et ta toodab induktiivset voolu. Samuti võib paispooli kohta ütelda, et ta tarbib induktiivset voolu ehk toodab mahtuvuslikku. Vastavalt kokkuleppele seotakse reaktiivvõimsuse mõiste induktiivse vooluga. Seepärast räägitaksegi, et paispool tarbib reaktiivset võim-



Joon. 36-6. Reaktiivvoolude tarbimise ja tootmise selgitamiseks

sust, kondensaator aga toodab seda ja on seega reaktiivvõimsuse generaatoriks.

Kui sünkroonmasina emj. E on võrgupingest U suurem, siis nimetatakse *masinat üleergutatuks*. On aga $E < U$, siis räägitakse *alaergutatud* masinast. Ülaltoodust (joon. 36-5, *a* ja *b*) selgub, et üleergutatud sünkroonmasin annab võrku induktiivset voolu ja on seega *reaktiivvõimsuse generaatoriks*. Samahästi võib aga ütelda, et üleergutatud sünkroonmasin tarbib võrgust mahtuvuslikku voolu. Teiste sõnadega, üleergutatud sünkroonmasin käitub võrgu suhtes nagu mahtuvus (kondensaator). Ümberpöördult, alaergutatud sünkroonmasin tarbib võrgust induktiivset voolu ja reaktiivvõimsust ning käitub võrgu suhtes nagu induktiivsus (paispool). Kokkuvõttes tuleb märkida, et sünkroonmasina ergutusvoolu muutmine põhjustab vaid masina reaktiivvoolu ja reaktiivvõimsuse muutumist ja seda ka siis, kui sünkroonmasin on koormatud aktiivvõimsusega.

Aktiivvõimsuse muutmine. Oletame jälle, et nähtamatute poolustega sünkroongeneraator on täpselt sünkroniseeritud võrguga (joon. 36-5, *a*). Generaator ei ole siis koormatud ei aktiiv- ega ka reaktiivvooluga. Jõumasin (näiteks auruturbiin) arendab sel puhul täpselt niisugust võimsust, mis jäägitult katab generaatori energiakaod tühijooksul. Jõumasina poolt arendatav pöördemoment on tasakaalustatud generaatori kaovõimsusest tingitud pidurdava momendiga võllil.

Suurendame nüüd jõumasina võimsust, juhtides näiteks auruturbiini rohkem auru. Mehaaniline pöördemoment generaatori võllil sel puhul suureneb, generaatori rootor saab teatud kiirenduse ja seega generaatori emj. E vektor tõttab võrgupinge U vektorist teatud nurga Θ võrra ette (joon. 36-7, *a*). Seega tekib jälle pingete vahe

$$\Delta \dot{U} = \dot{E} - \dot{U}$$

ning vool

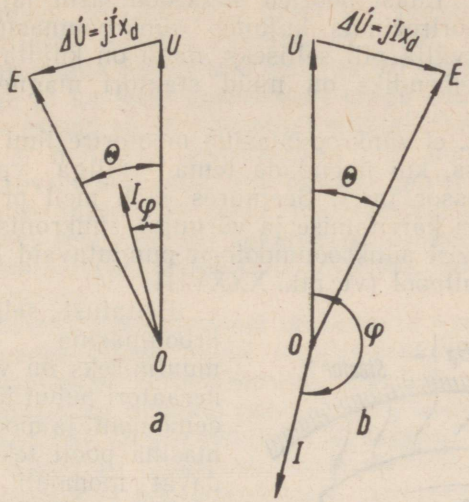
$$\dot{I} = \frac{\Delta \dot{U}}{\mathrm{j}x_d},$$

mis $\Delta \dot{U}$ suhtes on 90° võrra hilinev. See vool omab nüüd pinge $\dot{U}$ suhtes ka aktiivkomponendi ning seega sünkroonmasin arendab aktiivvõimsust

$$P = mUI \cos \varphi, \qquad (36\text{-}3)$$

mis antakse võrku. Valemis on U ja I faasisuurused.

Voolu I aktiivkomponendi ja magnetvoo vastastikusel toimel tekib generaatori võllil pidurdav moment ja rootori kiirendus hakkab vähenema. Nurga Θ (vt. joon. 36-7, *a*) ning voolu I aktiivkomponendi kasv jätkub seni, kuni saabub tasakaal jõumasina kiirendava ja generaatori pidurdava momendi vahel. Nurk Θ ja võim-



Joon. 36-7. Sünkroonmasina vektordiagrammid aktiivvõimsuse tootmise (*a*) ja tarbimise (*b*) selgitamiseks

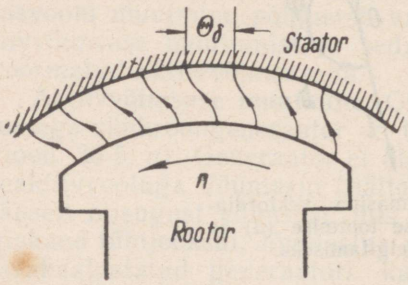
sus P omandavad siis teatud kindla väärtuse ning sünkroonmasin jääb tööle generaatorirežiimis püsiva koormusega, mis vastab jõumasina poolt arendatavale võimsusele. Generaator pöörleb endiselt sünkroonselt, tema rootor on ainult teatud nurga Θ võrra ette tõtanud, võrreldes tühijooksu olukorraga (vt. ka joon. 33-2).

Oletame nüüd, et pärast generaatori lülitamist paralleeltööle võrguga vähendame jõumasina võimsust, sulgedes näiteks auru sissepääsu turbiini. Sünkroonmasina rootor hakkab nüüd pidurduma ja ta kiirus väheneb. Emj. E vektor jääb nüüd võrgupinge U vektorist maha (joon. 36-7, *b*) ning pingevahe $\Delta\dot{U}$ toimel tekib staatori mähises vool I, mis $\Delta\dot{U}$ suhtes on 90° võrra järel. Voolu I aktiivkomponent on nüüd suunalt pingele $\dot{U}$ vastupidine ja seega masina võimsus P on nüüd negatiivne. Sama asjaolu selgub ka valemist (36-3), sest $\varphi > 90°$ (vt. joon. 36-7, *b*) puhul $\cos\varphi < 0$. Voolu I aktiivkomponendi ja magnetvoo vastastikusel toimel tekkiv pöördemoment muudab samuti oma märki, sest voolu aktiivkomponendi suund on vastupidine. Sünkroonmasina pöördemoment mõjub nüüd pöörlemise suunas.

Võimsuse ning momendi märgi muutus tähendab, et sünkroonmasin enam ei anna võimsust võrku, vaid tarbib seda võrgust. Seega sünkroonmasin töötab nüüd mootorina. Nurk Θ (joon. 36-7, *b*) ja võimsus P suurenevad seni, kuni saabub jälle tasakaal sünkroonmasina poolt arendatava ja võllil mõjuva pidurdava

momendi vahel. Edasi pöörleb sünkroonmasin jälle täiesti sünkroonselt. Mootorirežiimis kujuneb sünkroonmasina resulteeriva õhupilu magnetvälja pilt selliseks, nagu on kujutatud joon. 36-8. «Vedavaks» elemendiks on nüüd staatori magnetvoog (võrdle joon. 32-2).

On loomulik, et sünkroonmasina mootorirežiimi võib kasutada kasulikuks tööks, kui ühendada tema võlliga vastav töömasin (pump, kompressor jne.). Seejuures jääb meil praegu lahtiseks sünkroonmootori käivitamise ja võrguga sünkroniseerimise küsimus. Seda ja teisi sünkroonmootorit puudutavaid küsimusi vaatleme lähemalt allpool (vt. ptk. XXXVIII).



Joon. 36-8. Sünkroonmasina magnetväli õhupilus mootorirežiimi korral

Esitatust selgub, et sünkroonmasina aktiivvõimsuse muutmiseks on vaja muuta generaatori puhul jõumasina pöördemomenti ja mootori puhul töömasina poolt tekitatavat pidurdavat momenti võllil. Aktiivvõimsuse muutmisega kaasub ka teatav reaktiivvõimsuse muutumine, sest joonisel 36-7 näidatud juhtumitel esineb ka voolu reaktiivkomponent. Soovitud koormusrežiimi saavutamiseks tuleb üldjuhul muuta nii momenti võllil kui ka ergutusvoolu.

Sünkroonmasina aktiivvõimsuse muutmisel muutub ka nurk Θ masina ergutusvoo emj. E ja võrgupinge U vektorite vahel. Seepärast nimetatakse seda nurka koormusnurgaks. On kokku lepitud nurka Θ lugeda positiivseks, kui vektor E on vektorist U ees (joon. 36-7, *a*, generaatorirežiim) ja negatiivseks, kui vektor E jääb vektorist U maha (joon. 36-7, *b*, mootorirežiim).

Sünkroongeneraatorite paralleeltöö piiratud võimsusega süsteemis. Seni oletasime, et sünkroongeneraator on lülitatud paralleeltööle *ülivõimsasse võrku*, mille režiimi (pinget ja sagedust) üksiku generaatori töörežiimi muutmine ei suuda mõjutada. Tegelikkuses tuleb arvestada aga paljudel juhtudel võimalust, kus üksiku generaatori võimsus on kogu võrgu või süsteemi võimsusega võrreldes küllalt suur ning tema töörežiimi muutmine tunduvalt mõjutab kogu süsteemi režiimi. Et sellises olukorras esinevaid nähtusi põhimõtteliselt selgitada, võime lihtsuse mõttes oletada, et vaadeldavas süsteemis töötavad paralleelselt kaks ühesugust generaatorit, mis varustavad energiaga teatud tarbijate rühma.

Kui näiteks suurendada mõlema mainitud generaatori ergutusvoolu võrdsel määral, siis nende pinged ning pinge ka kogu võrgus samuti muutub, antud juhul tõuseb. Pinge muutudes üldiselt

muutub ka tarbijate, näiteks asünkroonmootorite poolt tarbitav reaktiivvõimsus. Vaadeldaval juhul see reaktiivvõimsuse muutus jaguneb ühtlaselt mõlema generaatori vahel.

Kui suurendada ainult ühe generaatori ergutusvoolu, siis kogu võrgu pinge ja ka teise generaatori pinge samuti tõuseb, kusjuures see tõus esineb siiski väiksemal määral. Kui enne ergutusvoolu suurendamist mõlemad generaatorid olid koormatud või andsid võrku reaktiivset võimsust, siis esimese generaatori ergutusvoolu suurendamise tagajärjel tema reaktiivvõimsus suureneb, teisel aga väheneb, sest viimase ergutusvool, jäädes absoluutväärtuse poolest konstantseks, suhteliselt väheneb, võrreldes suurenenud pinge väärtusega.

Ergutusvoolu vähendamisel on olukord vastupidine. Ka piiratud võimsusega võrgu puhul ergutusvoolude muutumine ei too kaasa generaatorite aktiivvõimsuste muutusi.

Kui suurendada mõlema generaatori jõumasina võimsust, hakkab generaatorite pöörlemiskiirus ja sagedus kasvama. Süsteemi sageduse tõusmisel suureneb tarbijate aktiivvõimsus, näiteks asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse suurenemise tõttu. Generaatorite pöörlemiskiirus ja süsteemi sagedus kasvavad seni, kuni saabub tasakaal (võrdsus) generaatorite poolt toodetava ja süsteemis tarbitava võimsuse vahel. Kui suurendatakse ainult ühe generaatori võimsust, siis esinevad analoogilised nähtused, mõlemad generaatorid töötavad sünkroonselt ja nende kiirused muutuvad ühtlaselt. Generaatorite võimsuste vähenemisel süsteemi sagedus langeb.

Olgu märgitud, et ka generaatorite ergutusvoolu muutmisel süsteemi sagedus muutub. Ergutusvoolu suurendamisel näiteks tõuseb süsteemi pinge, seejuures üldiselt ka tarbijate võimsus (elektrilampide võimsus, asünkroonmootorite kaod jne.) suureneb ning vastavalt sagedus langeb.

Tuleb silmas pidada, et energiasüsteemis peab statsionaarsete töörežiimide puhul igal juhul säilima toodetava ja tarbitava energia, samuti vastavate võimsuste tasakaal, sest elektrienergia akumuleerumist võrgus ei esine: nii palju kui teda toodetakse, sama palju ka tarbitakse. Samasugune tasakaal esineb ka reaktiivvõimsuste suhtes ning vajaliku reaktiivvõimsuse genereerimine pole süsteemi normaalse töörežiimi säilitamise seisukohalt sugugi vähema tähtsusega kui aktiivvõimsuse genereerimine. Aktiivvõimsuse puudujääk põhjustab energiasüsteemi sageduse langemise, reaktiivvõimsuse puudujääk aga pinge langemise.

NSV Liidus kehtivate normide nõuetest sünkroonmasinate töörežiimide suhtes. Üldised nõuded sünkroonmasinate suhtes on kindlaks määratud NSV Liidu üldises elektrimasinate standardis ГОСТ 183-55. Peale selle kehtivad erinõuded turbogeneraatoritele vastavalt standardile ГОСТ 533-51 ning hüdrogeneraatoritele standardi ГОСТ 5616-50 kohaselt.

Sünkroongeneraatoreid ehitatakse peamiselt nimivõimsusteguriga $\cos\varphi = 0{,}8$ induktiivse (võrku antava) voolu juures, aga ka nimivõimsusteguriga $\cos\varphi = 0{,}7$; 0,85; 0,9 (ind.). Sünkroonmootoreid ehitatakse peamiselt nimivõimsusteguriga $\cos\varphi = 0{,}9$ (maht.), s. o. võrgust normaalselt mahtuvuslikku voolu tarbivatena. Seega nii generaatorid kui ka mootorid ehitatakse töötamiseks üleergutatud režiimis.

Sünkroonmasinate nimiergutusvoolu ja nimiergutuspinge all mõistetakse vastavaid suurusi nimirežiimis või -koormusel.

Sünkroongeneraatoreid on lubatud koormata nimivõimsusega pinge või sageduse erinemisel nimisuurusest 5% võrra nimivõimsusteguri juures. Kui samaaegselt esineb nii pinge kui ka sageduse erinevus nimisuurustest, siis nende erinevuste absoluutväärtuste summa ei tohi ületada 5%. Mootorid peavad arendama nimivõimsust sageduse erinevusel kuni —5% ja toitepinge võimalikul erinevusel —5% kuni 10% võrra nimipingest, kusjuures sageduse ja pinge üheaegsel erinevusel nende kõrvalekallete absoluutväärtuste summa ei tohi ületada 10%.

36-3. SÜNKROONMASINATE VÕIMSUS-NURK-KARAKTERISTIKUD

Nurk-karakteristiku valem. Eespool selgus, et sünkroonmasina võimsus P sõltub koormusnurgast Θ. Seda sõltuvust, pidades silmas just suuruslikke vahekordi, nimetataksegi võimsus-nurk-karakteristikuks. Nurk-karakteristikute analüüs võimaldab selgitada rida sünkroonmasinate väga olulisi omadusi.

Tuletame nurk-karakteristiku valemi, mitte arvestades sünkroonmasina ankru mähise aktiivtakistust, mis antud küsimuse selgitamisel ei oma kuigi suurt tähtsust. Sel puhul jääb arvestamata vaid ankru mähise kaovõimsus. Jätame arvastamata ka ankru suhteliselt väikese rauaskao. Tehtud oletustel on sünkroonmasina võimsus ankru mähise klemmidel P ühtlasi ka elektromagnetiliseks võimsuseks P_{em} ja rootoris arendatavaks mehaaniliseks võimsuseks.

Rootoris arendatav mehaaniline moment M on seega võrdeline võimsusega P:

$$M = \frac{P}{\Omega} = \frac{pP}{\omega}, \tag{36-4}$$

kus

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \tag{36-5}$$

tähistab rootori mehaanilist nurkkiirust.

Joonisel 36-9 on esitatud nähtavate poolustega sünkroongeneraatori vektordiagramm. Vektordiagrammist leiame, et

$$E = x_d I_d + U \cos \Theta,$$
$$x_q I_q = U \sin \Theta,$$

millest avaldame piki- ja põikiteljelised voolud:

$$I_d = \frac{E - U \cos \Theta}{x_d}, \qquad (36\text{-}6)$$

$$I_q = \frac{U \sin \Theta}{x_q}. \qquad (36\text{-}7)$$

Arvestades, et joonise 36-9 kohaselt

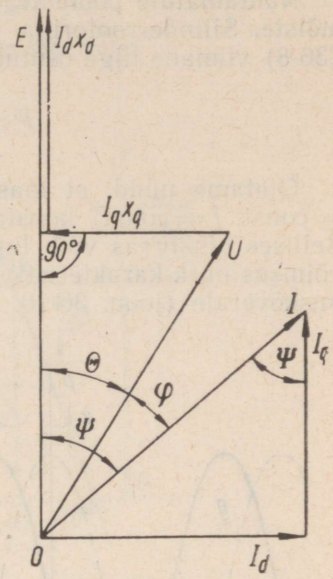
$$\varphi = \psi - \Theta,$$

saame võimsuse kohta avaldise:

$$P = mUI \cos \varphi = mUI \cos (\psi - \Theta) =$$
$$= mU(I \cos \psi \cdot \cos \Theta + I \sin \psi \cdot$$
$$\cdot \sin \Theta) = mU(I_q \cos \Theta + I_d \sin \Theta).$$

Asendades siin I_d ja I_q vastavalt avaldistega (36-6) ja (36-7), saame:

$$P = \frac{mU^2}{x_q} \sin \Theta \cdot \cos \Theta + \frac{mEU}{x_d} \sin \Theta -$$
$$- \frac{mU^2}{x_d} \sin \Theta \cdot \cos \Theta,$$



Joon. 36-9. Sünkroongeneraatori vektordiagramm

ehk lõplikult, ühendades leitud avaldise esimese ja viimase liikme:

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta. \qquad (36\text{-}8)$$

Tuletatud avaldis ongi võimsus-nurk-karakteristiku matemaatiliseks väljenduseks. Osutub, et sünkroonmasina võimsus oleneb pingest U, ergutusvoolu poolt indutseeritud elektromotoorsest jõust E, masina sünkroonsetest takistustest x_d, x_q ning koormusnurgast Θ.

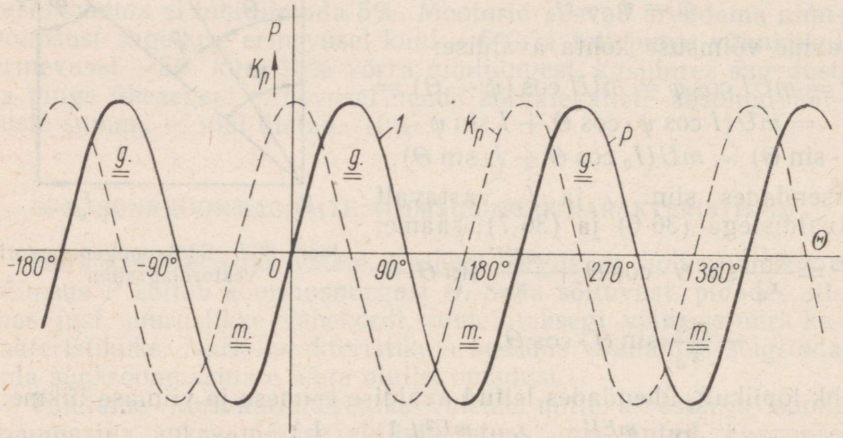
Avaldises (36-8) tuleb kasutada parameetrite x_d ja x_q antud sisemisele elektromotoorsele jõule E vastavaid küllastatud väärtusi. Ka emj. E suurus tuleb võtta sirgestatud tühijooksukarakteristikult vastavalt antud sisemise emj. E_δ väärtusele ja antud ergutusvoolule. Lihtsustatult võib E_δ asemel võtta ka pinge U.

Valemit (36-8) võib kasutada võimsuse määramiseks ka siis, kui pinge U all mõistetakse mitte pinget otse masina klemmidel, vaid mingis kaugemas masinaga ühendatud liini punktis (näiteks teisel pool trafot, liini tarbijapoolses otsas jne.). Sel juhul tuleb parameetrite x_d ja x_q väärtustesse kaasa arvata ka liini induktiivtakistus vaadeldava punktini. Koormusnurka Θ mõõdetakse alati vaadeldava pinge U ja emj. E vektorite vahel.

Nähtamatute poolustega sünkroonmasin. Staatilise stabiilsuse mõiste. Silinderrootoriga masinatel on $x_d = x_q$, seega avaldise (36-8) viimane liige osutub nulliks ning saame lihtsalt:

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin \Theta. \qquad (36\text{-}9)$$

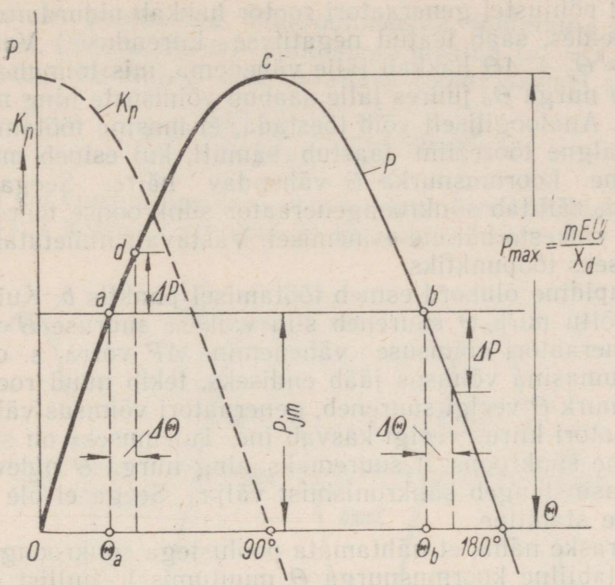
Oletame nüüd, et masin töötab ülivõimsas võrgus ($U = \text{const}$, $f = \text{const}$) konstantse ergutusvoolu juures ($E = \text{const}$). Sellises olukorras võib lugeda ka x_d konstantseks ning masina võimsus-nurk-karakteristik vastab avaldise (36-9) kohaselt siinuskõverale (joon. 36-10, kõver *1*). Positiivsed võimsuse väärtu-



Joon. 36-10. Nähtamatute poolustega sünkroonmasina võimsuse P nurk-karakteristik ja sünkroniseeriva võimsuse teguri K_p kõver

sed vastavad generaatorirežiimile, negatiivsed aga mootorirežiimile. Võimsuskõvera kuju kordub nurga 2π ehk 360° järel. Füüsikaliselt tähendab see seda, et rootori nihkumisel 360° (elektrilist) ehk kahe poolusjaotuse võrra, võrreldes rootori mingi esialgse asendiga, masina töörežiim jääb muutumatuks. See on ka täiesti mõistetav, sest sellisel nihkumisel jääb rootori põhja- ja lõunapooluste asend staatori suhtes endiseks. Seepärast on küllaldane vaadelda ainult nurga Θ muutumist piires $-\pi \leqslant \Theta < \pi$ ehk $-180° \leqslant \Theta \leqslant 180°$. Negatiivsed nurgad ($-180° < \Theta < 0°$) vastavad siis mootorirežiimile, positiivsed ($0° < \Theta < 180°$) aga generaatorirežiimile.

Joonisel 36-11 on omaette näidatud generaatorirežiimile vastav võimsuskarakteristiku osa. Statsionaarses töörežiimis jõumasina poolt arendatav võimsus P_{jm} on võrdne generaatori võimsusega P. Kuna P_{jm} oleneb ainult jõumasina enda režiimist, mitte aga nur-



Joon. 36-11. Sünkroongeneraatori staatilise stabiilsuse mõiste selgitamiseks

gast Θ, siis jõumasina võimsus on joonisel 36-11 kujutatav horisontaalse sirgjoonena. Jõumasina võimsusjoon lõikab generaatori võimsuskõverat punktides a ja b, milledele vastavad koormusnurgad Θ_a ja Θ_b. Mõlemas punktis on jõumasina ja generaatori võimsused võrdsed, seega statsionaarne töörežiim antud võimsuse juures on põhimõtteliselt võimalik nii nurga Θ_a kui ka nurga Θ_b juures. Küsimuse lähem analüüs aga näitab, et punktis b nurga Θ_b juures töörežiim ei ole stabiilne, punktis a aga on ta stabiilne.

Tõepoolest, oletame, et töötamine toimub punktile a vastavas režiimis (joon. 36-11) ning esineb väike lühiajaline töörežiimi häire, mille põhjus ruttu möödub. Praktikas esineb selliseid häireid väga mitmesugustel põhjustel. Oletame siinkohal näiteks, et jõumasina võimsus lühiajaliselt suurenes, mistõttu generaatoori rootor sai teatava kiirenduse ning tõttas väikese nurga $\Delta\Theta$ võrra ette (joon. 36-11, punkt d). Seejuures generaatori poolt arendatav võimsus suureneb ΔP võrra. Kuna aga jõumasina võimsus kohe taastub endisele tasemele, siis generaatori võimsus on ΔP võrra jõumasina võimsusest suurem. Vastavalt on ka generaatori poolt arendatav pidurdav moment suurem jõumasina pöördemomendist ja tekib tasakaalustamata pidurdav moment

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\Omega} = \frac{p \cdot \Delta P}{\omega}. \qquad (36\text{-}10)$$

Mainitud põhjustel generaatori rootor hakkab pidurduma ehk täpsemalt öeldes, saab teatud negatiivse kiirenduse. Vastavalt ka nurk $\Theta = \Theta_a + \Delta\Theta$ hakkab jälle vähenema, mis toimub seni, kuni punktis a nurga Θ_a juures jälle saabub võimsuste ning momentide tasakaal. Analoogiliselt võib tõestada, et masina töötamisel punktis a esialgne töörežiim taastub samuti, kui esineb mingi väike lühiajaline koormusnurka Θ vähendav häire. Seega, töötades punktis a, säilitab sünkroongeneraator sünkroonse töörežiimi vältimatute väikeste häirete esinemisel. Vastavalt nimetatakse punkti a stabiilseks tööpunktiks.

Vastupidine olukord esineb töötamisel punktis b. Kui juhuslike häirete tõttu nurk Θ suureneb siin väikese suuruse Θ võrra, siis tekib generaatori võimsuse vähenemine ΔP võrra, s. o. $\Delta P < 0$. Kuna jõumasina võimsus jääb endiseks, tekib nüüd rootori kiirenemine, nurk Θ veelgi suureneb, generaatori võimsus väheneb veel enam, rootori kiirus veelgi kasvab jne. Tulemuseks on siin kiiruse kasvamine sünkroonsest suuremaks ning nurga Θ pidev suurenemine. Masin langeb sünkronismist välja. Seega ei ole punktis b töötamine stabiilne.

Pole raske näha, et nähtamata poolustega sünkroongeneraatori töö on stabiilne koormusnurga Θ muutumisel nullist kuni 90°. Nurga $\Theta = 90°$ juures esineb maksimaalne võimsus

$$P_{max} = \frac{mEU}{x_d}, \tag{36-11}$$

mida nähtamatute poolustega generaator on suuteline arendama statsionaarses sünkroonses töörežiimis. On jõumasina võimsus $P_{jm} > P_{max}$, siis kaotab generaator sünkronismi.

Täiesti analoogiliselt on võimalik tõestada, et nähtamata poolustega sünkroonmootori töörežiim on stabiilne nurga Θ muutumisel 0° kuni —90° piirides.

Joonistel 36-11 ja 36-10 esitatud kõveratel on stabiilsed tööpiirkonnad näidatud tugevamate joontega.

Vaadeldud stabiilse töö küsimused kuuluvad nn. staatilise stabiilsuse valdkonda. Teatud masina või seadme töörežiimi nimetatakse staatiliselt stabiilseks siis, kui mingite väikeste töörežiimi häirete esinemisel pärast viimaste lakkamist endine töörežiim taastub. Nagu ülaltoodust selgub, võib *sünkroonmasina staatilise stabiilsuse kriteeriumi* matemaatiliselt väljendada järgmiselt:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \Theta} > 0. \tag{36-12}$$

Seejuures ΔP on nurgale $\Delta\Theta$ vastav sünkroonmasina võimsuse muutus tema nurk-karakteristiku järgi. Kui

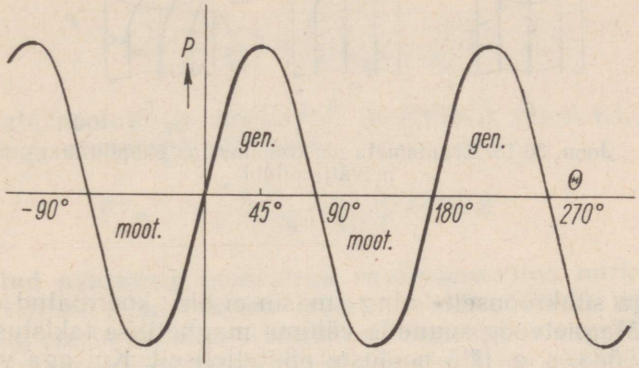
$$\frac{\Delta P}{\Delta \Theta} < 0,$$

siis ei ole töörežiim stabiilne.

Nähtavate poolustega sünkroonmasina töötamine ergutusvoo puudumisel. Olgu nähtavate poolustega masina ($x_d = x_q$) ergutusvool ja seega ka emj. E null. Avaldise (36-8) asemel saame siis:

$$P = \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\Theta. \qquad (36\text{-}13)$$

Juhul kui võrgupinge U = const, omab nurk-karakteristik avaldise (36-13) kohaselt joonisel 36-12 esitatud kuju.



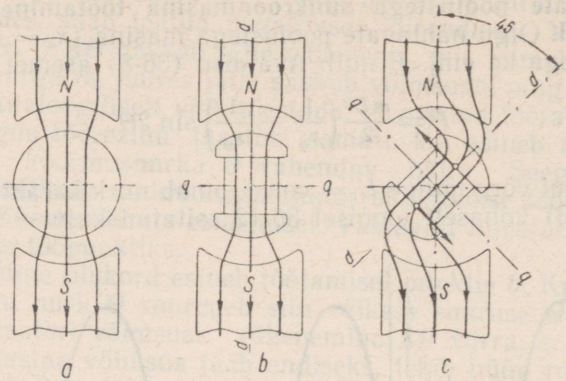
Joon. 36-12. Ergutamata nähtavate poolustega sünkroonmasina nurk-karakteristik

Avaldisest (36-13) ja joon. 36-12 selgub, et ergutamata nähtavate poolustega sünkroonmasin on suuteline arendama aktiivvõimsust, s. o. töötama nii generaatorina kui ka mootorina. Stabiilsed tööpiirkonnad on joonisel 36-12 näidatud tugevamate joontega. Avaldisest (36-12) ning jooniselt 36-12 selgub, et antud juhul režiimide vahetumine toimub sõltuvalt nurgast Θ kaks korda kiiremini kui nähtamatute poolustega masinal. Seega on stabiilse töö piiriks nurk $\Theta = \pm 45°$ ülalvaadeldud juhtumil esinenud nurga $\Theta = \pm 90°$ asemel.

Selgitame vaadeldavat küsimust füüsikaliselt. Joonisel 36-13, *a* on esitatud ergutamata nähtamatute poolustega masina magnetvälja pilt. Magnetvoog tekib siin ankru voolu toimel. Kuna rootor on silindriline, siis magnetvoo seisukohalt tema asend ei oma tähtsust ning rootori sünkroonsel pöörlemisel ei arenda masin mingit pöördemomenti ega ka aktiivvõimsust. Üldu on täielikult kooskõlas ka valemiga (36-13), mille kohaselt $x_q = x_d$ puhul

$$P = 0.$$

Joonisel 36-13, *b* on esitatud ergutamata nähtavate poolustega sünkroonmasina magnetvälja pilt juhul, kui rootor pöörleb staa-



Joon. 36-13. Ergutamata sünkroonmasina õhupilu magnetvälja pildid

tori vooga sünkroonselt ning masin ei ole koormatud ($P = 0$, $\Theta = 0$). Magnetvoog suundub vähima magnetilise takistusega teekonda mööda, s. o. läbi pooluste pikiteljeliselt. Kui aga võllile on rakendatud teatud mehaaniline moment, siis sünkroonselt pöörlevate pooluste asend staatori poolt tekitatud magnetvälja suhtes muutub (joon. 36-13, *c*), magnetjõujoonte kulg samuti muutub ning ilmuvad poolustele mõjuvad mehaanilised jõud F, mis põhjustavadki elektromagnetilise momendi tekkimise. Viimase toimel masin arendabki aktiivvõimsust, s. o. mootori puhul veab töömasinat, generaatori puhul aga annab elektrienergiat võrku. Kuna rootor ise ei oma kindlat polaarsust, siis töörežiim ei muutu rootori pöördumisel 180° (el.) võrra. Nurk-karakteristiku periood on seega antud tingimustes 180° (vt. joon. 36-12).

Ergutamata nähtavate poolustega sünkroonmasina töötamine põhineb ankrureaktsiooni voo toimel, mistõttu sellist *töörežiimi* nimetatakse *reaktiivseks*, olgugi et on tegemist aktiivvõimsusega koormatud masinaga.

Kuna ergutusvool puudub ja magnetvoog luuakse ainult ankru voolu toimel, siis tarbib reaktiivses režiimis töötav sünkroonmasin võrgust suhteliselt suurt reaktiivvoolu. Selle voolu suurus on $U : x_d$. Juhul kui $x^*_d < 1$, on see vool nimivoolust suurem ning seega reaktiivne režiim niisugusel masinal on lubatav ainult lühiajaliselt. Sünkroonmasin on reaktiivses režiimis suuteline töötama vaid siis, kui ta on lülitatud pingestatud vahelduvvooluvõrku, sest ainult siis saab tema ankru mähises tekkida vool.

Avaldise (36-13) kohaselt arendatakse reaktiivses režiimis maksimaalset võimsust juhul, kui $\Theta = 45°$. Seega

$$P_{max} = \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right), \qquad (36\text{-}14)$$

masina nimi-näivvõimsus aga avaldub üldiselt:

$$S_n = mU_nI_n = \frac{mU_n^2}{x_n}, \qquad (36\text{-}15)$$

kus x_n on nimitakistus. Seega P_{max} suhtelistest ühikutes

$$P^*_{max} = \frac{P_{max}}{S_n} = \frac{U^{*2}}{2}\left(\frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*}\right).$$

Nähtavate poolustega masinatel keskmiselt $x^*_d = 1{,}1$, $x^*_q = 0{,}75$. Seega nimipingel ($U^* = 1$)

$$P^*_{max} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{0{,}75} - \frac{1}{1{,}1}\right) = 0{,}212.$$

Ergutatud nähtavate poolustega sünkroonmasina nurk-karakteristik. Sellisel juhul tulevad arvesse avaldise (36-8) mõlemad liikmed ning masin arendab võimsust nii ergutusvoo osavõtul tekitatud elektromagnetilise momendi kui ka reaktiivse elektromagnetilise momendi arvel. Joonisel 36-14 on esitatud võimsuse mõlemad komponendid *1* ja *2* ning summaarse võimsuse kõver *3*. Nurk-karakteristiku generaatori- ja mootorirežiimide piirkonnad kujunevad täiesti sümmeetrilisteks.

Maksimaalne võimsus ja vastavalt ka staatiliselt stabiilse töö piir esineb nüüd teatava kriitilise koormusnurga Θ_{kr} juures, mis on mõnevõrra väiksem kui 90°. Kriitilise koormusnurga Θ_{kr} väärtus on avaldatav valemist

$$\cos\Theta_{kr} = \frac{\sqrt{A^2 - 8B^2} - A}{4B},$$

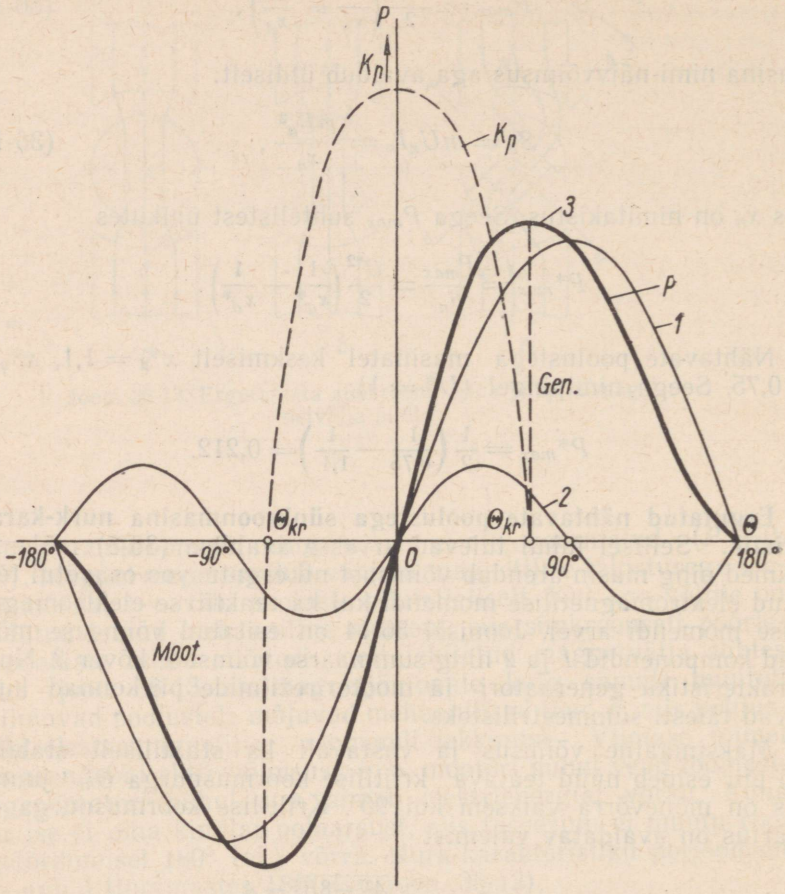
kus

$$A = \frac{mEU}{x_d}, \quad B = mU^2\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right).$$

Suhtelistes ühikutes saame (36-8) asemel:

$$P^* = \frac{E^*U^*}{x^*_d}\sin\Theta - \frac{U^{*2}}{2}\left(\frac{1}{x^*_q} - \frac{1}{x^*_d}\right)\sin 2\Theta. \qquad (36\text{-}16)$$

Keskmisel nähtavate poolustega generaatoril, nagu juba märgitud, on $x^*_d = 1{,}1$; $x^*_q = 0{,}75$. Nimikoormusel ($U^* = 1$; $I^* = 1$; $\cos\varphi = 0{,}8$ ind.) sellise generaatori emj. $E^* = 1{,}87$ ning $\Theta_n = 22°27'$. Seega vaadeldaval juhul



Joon. 36-14. Ergutatud nähtavate poolustega sünkroonmasina nurk-karakteristik

$$P^*_n = \frac{1{,}87 \cdot 1}{1{,}1} \sin 22°27' + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{0{,}75} - \frac{1}{1{,}1}\right) \sin 2 \cdot 22°27' =$$

$$= 1{,}7 \cdot 0{,}382 + 0{,}212 \cdot 0{,}706 = 0{,}80.$$

Nagu nähtub, on reaktiivse elektromagnetilise momendi ja võimsuse osatähtsus antud juhul ca 19%, seega tavalistel masinatel normaalsetes režiimides suhteliselt väike. Sellise generaatori maksimaalne võimsus nimipinge ($U^* = 1$) ja nimirežiimile vastava ergutuse juures esineb kriitilise koormusnurga $\Theta_{kr} = 77°$ puhul ning suhtelistes ühikutes $P^*_{max} = 1{,}75$, olles seega ligikaudu kaks korda suurem nimiaktiivvõimsusest ($P^*_n = 0{,}8$).

36-4. SÜNKROONMASINA SÜNKRONISEERIV VÕIMSUS JA MOMENT NING STAATILINE ÜLEKOORMATAVUS

Sünkroniseeriv võimsus ja moment. Eelmises paragrahvis selgus, et sünkroonmasin on võimeline teatud koormusnurga väärtuste piirkonnas sünkroonset töörežiimi säilitama. Seda põhjustab tasakaalustamata võimsus ΔP või tasakaalustamata moment ΔM (avaldis 36-10), mis tekib rootori kõrvalekaldumisel väikese nurga $\Delta\Theta$ võrra tasakaalustatud režiimist (vt. joon. 36-11, punkt *a*). Et elektromagnetiline võimsus ΔP ja moment ΔM põhjustavad masina tagasitulekut tasakaalustatud sünkroonsesse töörežiimi, siis nimetatakse neid vastavalt sünkroniseerivaks võimsuseks ja sünkroniseerivaks momendiks. Tasakaalustatud režiimist kõrvalekaldumisel esinev sünkroniseeriv toime on seda tugevam, mida suurem on sünkroniseeriva võimsuse ja momendi väärtused kõrvalekaldumisnurga $\Delta\Theta$ ühiku kohta, s. o. mida suuremad on suhted:

$$K_p = \frac{\Delta P}{\Delta \Theta}, \quad K_m = \frac{\Delta M}{\Delta \Theta}. \tag{36-17}$$

Seejuures eeldame, et nurga muutus $\Delta\Theta$ ise on väike. Üle minnes lõpmatult väikestele nurga muutustele, tuleb esitatud suhted asendada tuletistega:

$$K_p = \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\Theta}, \quad K_m = \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}\Theta}. \tag{36-18}$$

Avaldisega (36-18) määratud suurust K_p nimetatakse *sünkroniseeriva võimsuse teguriks*, K_m aga *sünkroniseeriva momendi teguriks*. Kui nende tegurite väärtused on tuntud, siis võime sünkroniseerivat võimsust ja momenti arvutada järgmiselt:

$$\Delta P = K_p \cdot \Delta\Theta, \quad \Delta M = K_m \cdot \Delta\Theta$$

ehk

$$\mathrm{d}P = K_p \cdot \mathrm{d}\Theta, \quad \mathrm{d}M = K_m \cdot \mathrm{d}\Theta. \tag{36-19}$$

Sünkroniseeriva võimsuse teguri avaldise nähtavate poolustega sünkroonmasinale võib leida, kui arvutada valemist (36-8) võimsuse tuletis nurga Θ järgi:

$$K_p = \frac{mEU}{x_d}\cos\Theta - mU^2\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\cos 2\Theta. \tag{36-20}$$

Samasuguse masina sünkroniseeriva momendi tegur

$$K_m = \frac{pK_p}{\omega} = \frac{pmEU}{\omega x_d}\cos\Theta - \frac{pmU^2}{\omega}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\cos 2\Theta. \tag{36-21}$$

Nähtamatute poolustega masinal ($x_d = x_q$) avalduvad nimetatud tegurid järgmiselt:

$$K_p = \frac{mEU}{x_d} \cos \Theta, \qquad (36\text{-}22)$$

$$K_m = \frac{pmEU}{x_d} \cos \Theta. \qquad (36\text{-}23)$$

Nagu näha, on tegurid K_p ja K_m omavahel võrdelised suurused.

Joonistel 36-10, 36-11 ja 36-14 on esitatud sünkroniseeriva võimsuse teguri K_p kõverad punktiirjoontega. Võrreldes stabiilsuse kriteeriumit (36-12) avaldistega (36-17) ja (36-18), samuti P ja K_p kõveraid joonistel 36-10, 36-11 ja 36-14 esitatutega, võime järeldada, et stabiilse töö piirkondades on sünkroniseeriva võimsuse ja momendi tegurid K_p ja K_m positiivsed, mittestabiilsetes piirkondades aga negatiivsed. Järelikult positiivsete K_p ja K_m väärtuste puhul toimivad sünkroniseerivad võimsused ja momendid tasakaalustatud sünkroonse töörežiimi taastamise suunas, negatiivsete K_p ja K_m puhul aga vastupidises suunas. Tegurite K_p ja K_m positiivne märk on stabiilse režiimi tunnuseks.

Mida suurem on tegurite K_p ja K_m tegelik väärtus, seda suurem on sünkroniseeriv võimsus ja moment antud nurga muutuse $\Delta\Theta$ või $d\Theta$ puhul. Järelikult sünkroonse töörežiimi stabiilsus on seda suurem, mida suuremad on K_p ja K_m. Joonistel 36-10, 36-11 ja 36-14 selgub, et stabiilse tööpiirkonna rajale lähenemisel tegurid K_p ja K_m vähenevad. Samuti väheneb seal ka sünkroonmasina võime säilitada stabiilset sünkroonset töörežiimi.

Sünkroonmasina staatiline ülekoormatavus. Kui sünkroonmasina võimsus on null, võrdub nulliga ka tema koormusnurk: $\Theta = 0$. Võimsuse suurenemisel kasvab ka nurk Θ. Kriitilise koormusnurga Θ_{kr} puhul saavutab masin maksimaalse võimsuse P_{max} ning edasisisel võimsuse suurenemisel langeb hoopis sünkronismist välja ning hakkab pöörlema asünkroonselt. Seejuures generaatori pöörlemiskiirus kujuneb sünkroonsest suuremaks, mootoril aga väiksemaks. Selline asünkroonne töörežiim pole normaalne ega ole üldiselt lubatav. Sünkroonmasinate ekspluateerimisel tuleb alati hoolitseda, et stabiilne sünkroonne töörežiim oleks küllaldasel määral kindlustatud.

Stabiilse töö tagamiseks on vajalik, et maksimaalne võimsus P_{max}, mida sünkroonmasin arendab kriitilise koormusnurga Θ_{kr} juures, oleks küllalt suur. Valemist (36-11) selgub, et nähtamatute poolustega sünkroonmasina puhul P_{max} on seda suurem, mida suurem on ergutusvoolu poolt indutseeritud emj. E ja võrgupinge U ning mida väiksem on sünkroonne takistus x_d. Ka nähtavate poolustega masina võimsuse avaldises (36-8) mängib põhilist osa esimene liige, mistõttu eelöeldu kehtib üldiselt ka nende suhtes.

Seega stabiilse töö seisukohalt on soovitav, et sünkroonsed takistused oleksid võimalikult väiksemad, seega vastavalt lühise-

suhe (k_l) suurem, teiste sõnadega — ankrureaktsiooni mõju on otstarbekas piirata suurendatud õhupiluga. Mida võimsam on sünkroonmasin, seda olulisem on tema stabiilsuse tagamine, sest sünkronismi kaotanult häirib ta tugevasti kogu süsteemi režiimi. Seepärast on ka võimsamatel masinatel sünkroonsed takistused väiksemad.

Üksikute sünkroonmasinate ja kogu energiasüsteemi stabiilse töö seisukohalt on ka oluline, et nii normaalsetes kui ka avariirežiimides oleks võrgu pinge lähedane nimipingele. Kuna emj. E on võrdeline ergutusvooluga, siis suuremate ergutusvoolude juures, mis esineb generaatorite induktiivse iseloomuga koormuse puhul, on paralleeltöö kindlam.

Küllaldase stabiilsuse tagavara esinemiseks peab nimiaktiivvõimsus P_n olema küllalt palju väiksem maksimaalsest võimsusest P_{max}. Tuleb ka arvestada seda, et avariide, näiteks lühiste puhul võrgus pinge sünkroonmasinate klemmidel tublisti langeb, kusjuures ka sellistel juhtudel tuleb püüda masinate sünkroonset tööd säilitada, sest võimsate generaatorite sünkronismist väljalangemine tekitab energiasüsteemis äärmiselt raske avariiolukorra.

Sünkroonmasina ülekoormatavuseks nimetatakse nimipinge ja nimiergutusvoolu juures esinevat maksimaalse võimsuse ja nimivõimsuse suhet:

$$K_{ü} = \frac{P_{max}}{P_n}, \tag{36-24}$$

mis võrdub ühtlasi maksimaalse elektromagnetilise ja nimi-elektromagnetilise momendi suhtega. Suhe $K_{ü}$ iseloomustab sünkroonmasina võimsuse tagavara ja seega ka stabiilsuse tagavara. Ülekoormatavus on seda suurem, mida väiksema nurga Θ_n juures masin nimikoormusel töötab. Tavaliselt see nurk on piirides $\Theta_n = 20 \ldots 35°$.

Avaldise (36-15) kohaselt nimivõimsus

$$P_n = S_n \cos \varphi_n = \frac{m U_n^2}{x_n} \cos \varphi_n. \tag{36-25}$$

Seega nähtamatute poolustega sünkroonmasinate puhul, rakendades valemit (36-11) nimirežiimi olukorras ($U = U_n$, $E = E_n$), saame:

$$K_{ü} = \frac{E^*_n}{x^*_d} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_n}. \tag{36-26}$$

Nimivool suhtelistes ühikutes on $I_n^* = 1$. Seega

$$x_d^* = x_d^* I_n^* = E_l^*,$$

kus E_l^* on selline ergutusvoolu poolt indutseeritud emj., mis kolmefaasilise statsionaarse lühise puhul annab nimivoolu I_n. Vastavalt

$$\frac{E^*_n}{x^*_d} = \frac{E^*_n}{E^*_l}.$$

Et aga E on võrdeline ergutusvooluga, siis nähtamatute poolustega masinate kohta võime avaldise (36-26) asemel kirjutada:

$$K_ü = \frac{I_{en}}{I_{el} \cos \varphi_n}, \tag{36-27}$$

kus I_{en} on nimiergutusvool ja I_{el} — ergutusvool statsionaarsel kolmefaasilisel lühisel nimiankruvoolu juures. On võimalik ka tõestada, et nähtamatute poolustega masinatel võib $K_ü$ väljendada ka teisiti:

$$K_ü = k_l \frac{I_{en}}{I_{e0} \cos \varphi_n}, \tag{36-28}$$

kus k_l on lühisesuhe (vt. p. 33-3), I_{e0} aga ergutusvool tühijooksul nimipinge juures.

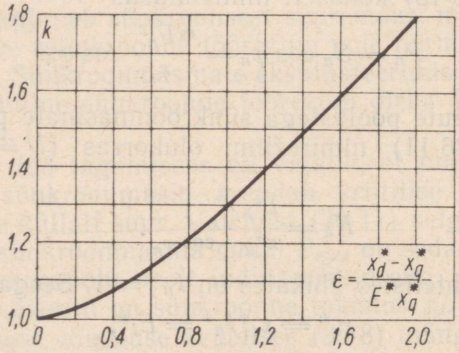
Valemid (36-27) ja (36-28) on toodud NSV Liidu standardis turbogeneraatoritele ГОСТ 533-51. Selle standardi kohaselt turbogeneraatorite ülekoormatavus peab olema vähemalt $K_ü = 1{,}7$.

Olgu märgitud, et avaldisest (36-9) tuleneb ka veel järgmine valem nähtamatute poolustega sünkroonmasinatele:

$$K_ü = \frac{1}{\sin \Theta_n}, \tag{36-29}$$

kus Θ_n on koormusnurga väärtus nimikoormusel.

Nähtavate poolustega sünkroonmasinate staatiline ülekoorma-



Joon. 36-15. Nähtavate poolustega sünkroonmasina reaktiivset elektromagnetilist momenti arvestav tegur k

tavus on määratav samade valemitega (36-26), (36-27) ja (36-28), kui viia neisse täiendavalt tegur k, mis arvestab reaktiivse elektromagnetilise momendi mõju. Tegur k seejuures on määratav joonise 36-15 alusel, kus

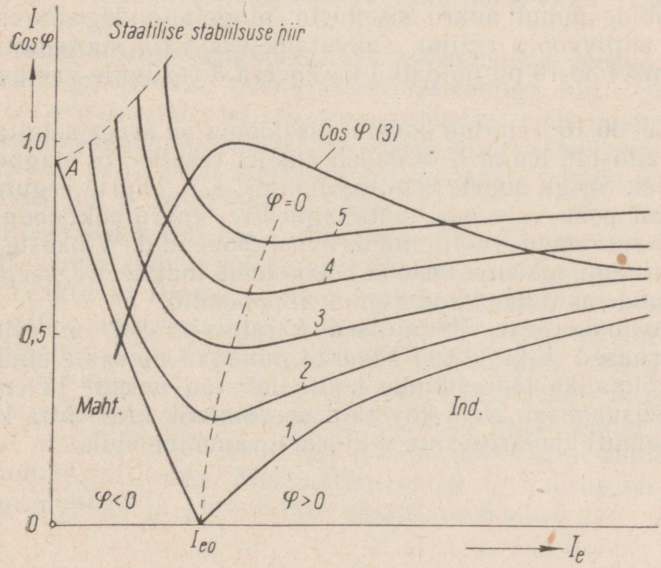
$$\varepsilon = \frac{x^*_d - x^*_q}{E^*_n \cdot x^*_q}.$$

Sünkroonmootorite staatiline ülekoormatavus nimivõimsusteguri $\cos \varphi_n = 0{,}9$ (maht.) puhul peab ГОСТ 183-55 kohaselt olema vähemalt $K_ü = 1{,}65$.

36-5. SÜNKROONMASINA TÖÖTAMINE KONSTANTSE VÕIMSUSE JA MUUTUVA ERGUTUSE PUHUL

Nagu oli selgitatud p. 36-2, põhjustab sünkroonmasina ergutusvoolu muutmine ainult ankru reaktiivvoolu ja reaktiivvõimsuse muutumise. Nüüd selgitame lähemalt ankru voolu I sõltuvust ergutusvoolust I_e konstantse aktiivvõimsuse režiimis töötamisel paralleelselt ülivõimsa võrguga ($U = \text{const}$, $f = \text{const}$). Mainitud sõltuvust iseloomustatakse tavaliselt nn. V-kujuliste kõverate (karakteristikute) abil (joon. 36-16).

Joonisel 36-16 on esitatud sünkroongeneraatori V-kujulised karakteristikud. Kõvera 1 puhul on aktiivvõimsus ja voolu aktiiv-



Joon. 36-16. Sünkroonmasina V-kujulised karakteristikud

komponent nullid, s. o. generaator töötab tühijooksurežiimis. Sellel kõveral on ergutusvoolu väärtusel I_{e0} ka ankru vool null. Niisugune olukord vastab joonisel 36-5, *a* toodud vektordiagrammile. Ergutusvoolu suurendamisel ($I_e > I_{e0}$) tekib ankrus induktiivne vool ($\varphi > 0$), mis on seda suurem, mida suurem on ergutusvool (vt. joon. 36-5, *b*); teiselt poolt aga ergutusvoolu vähendamisel I_{e0} väärtusest allapoole tekib ankrus mahtuvuslik vool, seejuures seda suurem, mida väiksem on ergutus (vt. joon. 36-5, *c*). Vastavalt sellele algab kõver *1* (joon. 36-16) abstsissteljelt punktist $I_e = I_{e0}$ ning tõuseb edasiselt nii paremale kui ka vasakule. Punktis *A* on ergutusvool null, masinas esineb ainult ankrureaktsiooni voog ning ankru vool

$$I = \frac{U}{x_d}.$$

Kõverad *2, 3, 4, 5* (joon. 36-16) vastavad igaüks teatavale kindlale aktiivvõimsusele ning seega ka voolu aktiivkomponendile, seejuures seda suuremale, mida kõrgemalt vastav kõver kulgeb. Iga kõvera miinimumi kohal on ankru vool puhtaktiivne ($\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$), ergutusvoolu muutumisel aga alati suureneb voolu reaktiivkomponendi tekkimise arvel. Paremal asub induktiivse, vasakul aga mahtuvusliku iseloomuga voolude piirkond. Koormatud generaatori puhul ei ole muidugi enam võimalik ergutusvoolu nullini viia, sest emj. *E* vähenemise tõttu teatud ergutusvoolu väärtuse juures generaator jõuab staatilise stabiilsuse piirini ja langeb sünkronismist välja. Ankru voolu minimaalväärtusi ühendav punktiirjoon graafikul kaldub paremale (vt. joon. 36-16), sest suuremate voolude puhul ankru sisemiste pingelangude suurenemise tõttu on aktiivvoolu režiimi saavutamiseks vaja suuremat ergutust. Joonisel 36-16 on näidatud ka kõvera *3* režiimile vastav $\cos\varphi$ kõver.

Joonisel 36-16 esitatud kõverate iseloomu on kerge selgitada ka puhtfüüsikaliselt. Kuna $U \approx$ const, siis ka resulteeriv magnetvoog $\Phi_\delta \approx$ const. Seega suurte ergutusvoolude, s. o. suurte ergutusvoogude puhul peab esinema lahtimagneetiv ankrureaktsioon ning vastavalt suuremad voolu induktiivkomponendid. Väikeste ergutuste puhul aga ankrureaktsioon peab olema magneetiv, seega peavad esinema mahtuvuslikud voolukomponendid.

Sünkroonmootorite *V*-kujulised karakteristikud on esitatuile täiesti sarnased. *V*-kujulised kõverad annavad ülevaate sünkroonmasina võimalike töörežiimide kohta lubatud ankru- ja ergutusvoolude seisukohast. Neid kõveraid on võimalik üles võtta ka katseliselt, samuti konstrueerida vektordiagrammide abil.

SÜNKROONMASINATE ASÜNKROONSED REŽIIMID

37-1. SÜNKROONGENERAATORITE ASÜNKROONSED TÖÖREŽIIMID

Sünkronismist väljalangemisel jääb sünkroonmasin paralleelselt võrgu või süsteemiga tööle asünkroonselt, s. o. pöörlemiskiirusel, mis sünkroonsest erineb. Sellises režiimis käitub sünkroonmasin põhimõtteliselt nagu asünkroonmasin, kuid rootori erineva konstruktsiooni tõttu siiski oluliste iseärasustega. Sünkroonmasinate asünkroonsed režiimid esinevad tegelikkuses küllaltki sageli ning seepärast selliste režiimide iseärasuste kindlaksmääramine ning otstarbekohaste normaalsete töörežiimide taastamise abinõude väljaselgitamine on küllalt oluline. Mainitud probleemi on Nõukogude Liidus viimastel aastatel tõhusalt uuritud ning uurimistulemuste rakendamise tagajärjel on energiasüsteemide töökindlus tunduvalt paranenud. Olulist tööd on sel alal teinud tehn. tead. dr. I. A. Sõromjatnikov, tehn. tead. kand. L. G. Mamikonjants jt. Kõne all oleva küsimuse selgitamisel allpool peetakse silmas eeskätt sünkroongeneraatoreid, kuigi tulemused on rakendatavad ka sünkroonmootorite puhul. Oluline küsimus antud valdkonnast on ka sünkroonmootorite asünkroonne käivitus. Seda küsimust käsitletakse aga järgmises peatükis.

Asünkroonsed režiimid võivad esineda nii sünkroonmasina ergutatud kui ka ergutamata olekus. Tutvume kõigepealt viimase kui lihtsama juhuga.

Ergutamata sünkroongeneraatori asünkroonne režiim. Selline režiim tekib generaatori paralleeltööl süsteemiga, kui ergutusvool kaob (rike ergutusmasinas või ergutusahelas, väljakustutusautomaadi vale rakendamine jne.). Seejuures generaatori ergutusahel võib olla kas avatud või suletud ergutaja ankru mähise, väljakustutustakisti (vt. p. 36-4) jne. kaudu.

Ergutuse kadumisel suudab sünkroonkiiruse juures võimsust arendada ainult nähtavate poolustega sünkroongeneraator ning just nn. reaktiivse momendi arvel. Võimsus seejuures on aga suhteliselt väike ning ergutuse kadumisel tavaliselt masin langeb sünkronismist välja. Kuna jõumasin töötab edasi, siis generaatori pöörlemiskiirus kasvab sünkroonsest suuremaks ning masin läheb üle asünkroongeneraatori töörežiimi, mille puhul võrgust tarbitava magneetimisvoolu poolt loodud pöördvälja suhtes libistus osutub negatiivseks. Magneetimisvoolu I_μ suurus on määratud võrgupingega ja pikiteljelise sünkroontakistusega:

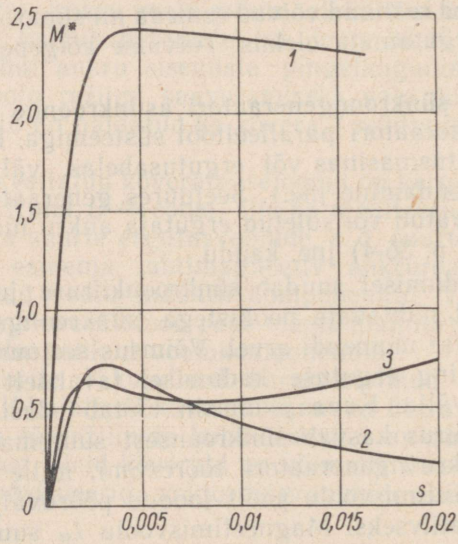
$$I_\mu = \frac{U}{x_d}.$$

Kuna turbogeneraatoritel $x_d = 1{,}2 \ldots 2{,}2$, siis nende magneetimisvool on väiksem nimivoolust, moodustades tavaliselt 50 ... 65% viimasest. Seevastu võimsatel hüdrogeneraatoritel on magneetimisvool nimivoolust suurem.

Töötades asünkroongeneraatorina, arendab masin aktiivvõimsust ja seda just rootoriahelates (ergutus- ja summutusmähis, massiivsed rootori osad) indutseerivate voolude kaastoimel, nagu tavalises asünkroonmasinaski. Sünkroonmasina omadused asünkroonrežiimis sõltuvad seega oluliselt masina rootorist.

Kõige soodsamaks kujuneb asünkroonrežiimis olukord massiivse rootoriga nähtamatute poolustega sünkroonmasinatel, s. o. turbogeneraatoritel. Mõõdukate libistuste puhul on massiivses rootoris indutseeritavate voolude sagedus väike, pinnaefekt seega praktiliselt puudub ning indutseeritud voolud esinevad kogu massiivses rootorikehas. Viimase aktiivtakistus nendele vooludele kujuneb ka vastavalt väikeseks. Nähtamatute poolustega sünkroonmasina asünkroonse pöördemomendi sõltuvus libistusest $M = f(s)$ (joon. 37-1, kõver *1*) sarnaneb tavalise asünkroonmasina momendikõveraga, kuid rootori väikese aktiivtakistuse tõttu omab väikestel libistustel veelgi järsemat tõusu.

Asünkroongeneraatori režiimis tõuseb sünkroonmasina kiirus seni, kuni pidurdav asünkroonne pöördemoment saab võrdseks



Joon. 37-1. Ergutamata sünkroongeneraatorite pöördemomendi sõltuvus libistusest:
1 — turbogeneraator; *2* — summutusmähiseta hüdrogeneraator; *3* — summutusmähisega hüdrogeneraator

jõumasina momendiga. Et turbogeneraatori asünkroonse momendi kõvera tõus on järsk, siis saabub tasakaal juba üsna väikeste libistuste puhul. Tavaliselt turbogeneraatorid on asünkroonses režiimis suutelised arendama nimivõimsust libistustel, mis moodustavad murdosa protsendist. Rootoris esinevad kaod on seejuures väiksemad kui normaalses sünkroonrežiimis ning rootori kuumenemist pole seega karta. Turbogeneraatori võimsust asünkroonses režiimis piirab seepärast staatori vool, mis suure magneetimisvoolu tõttu ületab nimivoolu varem, kui masin saavutab nimi-aktiivvõimsuse. Enamikul juhtudel arendavad turbogeneraatorid asünkroonrežiimis staatori nimivoolu juures 50 ... 70% nimivõimsusest.

Kuna turbogeneraatorite asünkroonsed režiimid on võrdlemisi soodsad, siis NSV Liidus viimastel aastatel kehtestatud eeskirjad lubavad nende lühiajalist (kuni 30 min.) töötamist ergutuseta asünkroonrežiimis eeldusel, et seejuures kaod rootoris ja staatoris ei ületa nimitöörežiimi kadusid ning et süsteemi töörežiimi seisukohalt vajalike magneetimisvoolude tarbimine võrgust on lubatav. Mainitud ajavahemiku vältel on võimalik kas kõrvaldada ergutusahelas esinenud rikked või viia generaator üle reservergutusele, samuti kanda koormus üle teistele generaatoritele või jaamadele. Selliste eeskirjade rakendamine tagab paremini tarbijate katkestamatu energiaga varustamise.

Hüdrogeneraatorite asünkroonsed karakteristikud on märksa halvemad. Kui puudub summutusmähis ning poolused ei ole massiivsed, nagu see tavaliselt esinebki, siis masin arendab asünkroonset momenti ainult ergutusmähises indutseeritavate voolude arvel. Moment on seejuures väike (joon. 37-1, kõver *2*), samuti on väike ka masina võimsus. Parem on olukord summutusmähiseid omavatel masinatel. Viimased on tavaliselt hüdrogeneraatoritel siiski nõrgad, s. o. omavad suhteliselt suurt aktiivtakistust. Seepärast tõuseb momendi kõver $M = f(s)$ aeglaselt ning suuremate võimsuste saamiseks tuleks lubada suuri libistusi (joon. 37-1, kõver *3*). Seejuures aga muutuvad rootori võimsuskaod lubamatult suureks. Ka on suur hüdrogeneraatorite magneetimisvool, nagu juba varem märgitud. Mainitud põhjustel lubatakse hüdrogeneraatoreid töötada asünkroonses režiimis ainult väga lühiajaliselt, 10 ... 15 sekundi vältel. Kui selle aja vältel pole võimalik generaatorit ergutuse taastamise teel uuesti sünkroniseerida, siis tuleb ta võrgust välja lülitada.

Sünkroonmootorite ergutusvoolu katkemisel esinevad üldiselt analoogilised nähtused, ainult siin kujuneb asünkroonmootori režiim ja seega pöörlemiskiirus on sünkroonsest kiirusest väiksem.

Ergutatud sünkroonmasina asünkroonne režiim. Selline režiim esineb ergutatud sünkroonmasina sünkronismist väljalangemisel. Kõige sagedamini toimub see lühiste puhul võrgus, kui pinge sünkroonmasinate klemmidel langeb ning nende võime taluda

koormust väheneb (vt. p. 36-3). On loomulik, et selline hädaoht tekib eeskätt masinatel, mis töötavad võrgus lühisepunkti läheduses. Sünkronismist väljalangenud üksiku generaatori kiirus suureneb, mootoril aga väheneb. Ekspluatatsioonis esineb sünkronismist väljalangemisi küllaltki sagedasti.

Asünkroonses režiimis töötava ergutatud masina mähiste voolusid ja magnetvoogusid on otstarbekas analüüsida superpositsioonimeetodil, vaadeldes eraldi voolusid ja voogusid, mis on tekitatud ühelt poolt võrgupinge toimel ning teiselt poolt alalis-ergutusvoolu toimel.

Võrgupinge mõjul tekib eelmises lõigus vaadeldud asünkroonne režiim. Masin tarbib võrgust induktiivset magneetimisvoolu, luues võrgu sagedusele vastava liikumiskiirusega pöördvälja, mis rootori suhtes pöörleb libistussagedusega. Rootoriahelates indutseeritakse libistussagedustega vool, kusjuures selle voolu ja eelmainitud magnetvoo toimel tekib asünkroonne pöördemoment. Selle momendi mõjul masin arendab aktiivvõimsust. Seejuures esineb staatori mähises ka võrgusagedusega voolu koormuskomponent. Kui rootori ebasümmeetriat mitte arvestada, siis mainitud pöördemoment on ühtlane ja oleneb ainult libistusest.

Ergutajalt saadava alalis-ergutusvoolu toimel indutseeritakse staatori mähises emj., mille sagedus erineb võrgusagedusest, sest rootori kiirus ei ole võrgu suhtes sünkroonne. Niisuguse emj. suhtes on staatori mähis praktiliselt lühistatud, sest võrgus teisi selle sagedusega elektromotoorseid jõudusid pole ning takistusena tuleb arvesse ainult kogu võrgu, kaasa arvatud viimasesse lülitatud masinate ja seadmete resulteeriv takistus, mis on suhteliselt väike. Tulemusena tekib staatori mähises suhteliselt tugev peaaegu puhtreaktiivne vool, mille sagedus erineb võrgusagedusest libistussageduse võrra. Selle voolu poolt tekitatud magnetvoog pöörleb rootoriga sünkroonselt ning tekitab koos alalis-ergutusvooluga teatud konstantse pöördemomendi, mis on aga suhteliselt väike. Viimane on alati pidurdav (generaatori moment).

Seega esineb staatori mähises kaks erineva sagedusega voolu ning summaarne staatori vool hakkab tugevasti pulseerima libistussagedusega. Ka ergutusmähises esineb voolu ja pinge pulseerimine, sest alalisvoolule lisandub libistussagedusega vool.

Peale kahe juba mainitud konstantse pöördemomendi tekib veel kaks tugevasti pulseerivat pöördemomenti. Esimene nendest kujuneb võrguvoolu poolt loodud ja rootori suhtes libistussagedusega pöörleva magnetvoo ning alalis-ergutusvoolu koostoimel. See moment ja temale vastav võimsus vastavad oma iseloomult sünkroonmasina normaalse töörežiimi momendile ja võimsusele, ainult libistuse esinemise (koormusnurga Θ pideva muutumise) tõttu nad pulseerivad, muutes seejuures ka oma märki, nii et vaheldumisi esineb nii generaatori- kui ka mootorirežiim (vt. joon. 36-10). Teine pulseeriv ja oma märki muutev moment tekib alalis-ergu-

tusvoolu poolt staatori mähises indutseeritud voolu ankrureaktsiooni voo ja rootori libistussagedusega muutuvate voolude koostoimel. Ka selle momendi suhtes esineb vaheldumisi nii generaatori- kui ka mootorirežiim. Vastav võimsus on samuti pulseeriv ning muudab oma märki.

Resulteeruv pöördemoment ja võimsus omavad teatava konstantse komponendi ning tugeva pulseeriva komponendi. Esinevate vibratsioonide, samuti suurte voolude tõttu kujuneb vaadeldav režiim masinale raskeks ning väga ebasoovitavaks. Seepärast osutub vajalikuks kas kiiresti taastada sünkroonne režiim või kui kiire sünkroniseerimine (10 . . . 20 sekundi vältel) ei osutu võimalikuks — viia masin esialgu ergutuseta asünkroonsesse režiimi, et vähendada libistust ning luua paremad tingimused sünkronismi taastamiseks, äärmisel juhul aga lülitada masin võrgust välja.

37-2. ASÜNKROONSES REŽIIMIS TÖÖTAVA SÜNKROONMASINA SÜNKRONISEERIMINE

Sünkroonmasina asünkroonseid režiime püütakse ekspluatatsioonis vältida vastava järelevalvega ning automaatseadmete rakendamisega, kuid täiel määral seda teostada tavaliselt ei õnnestu. Varem oli traditsiooniks sünkronismist väljalangenud sünkroonmasin võimalikult kiiresti välja lülitada. Viimastel aastatel on Nõukogude Liidus saanud tavaks püüda sellist masinat uuesti võrguga sünkroniseerida, mis vastavate abinõude rakendamisel ka enamikel juhtudel osutub võimalikuks. Sellega viiakse ühtlasi energiasüsteemis tekkivate avariide ja häirete tagajärjed minimaalseiks ning parandatakse tõsiselt süsteemi tööd.

Ergutatud asünkroonses režiimis töötav sünkroonmasin on võimeline sünkronismi tõmbuma juhul, kui võrgupinge ja ergutusvool on küllalt suured ning masina koormus ei ole liigselt suur. Sünkronismi tõmbumine toimub kahe magnetvoo koostöö toimel. Üks neist on staatori voog, mida tekitab võrgupingest tingitud ankruvool, teine aga rootori voog, mida põhjustab alalis-ergutusvool. Asünkroonse režiimi olukorras pöörlevad need vood üksteise suhtes libistussagedusega. Samal ajal tekivad voogude koostöö toimel jõud, mis püüavad rootori kiirust muuta nii, et voogude kiirused saaksid võrdseiks — see aga tähendabki sünkronismi saabumist. Praegu kirjeldatav nähtus on täiesti analoogiline kahe magneti liikumisega, mis magnetiliste jõudude toimel püüavad liikuda koos.

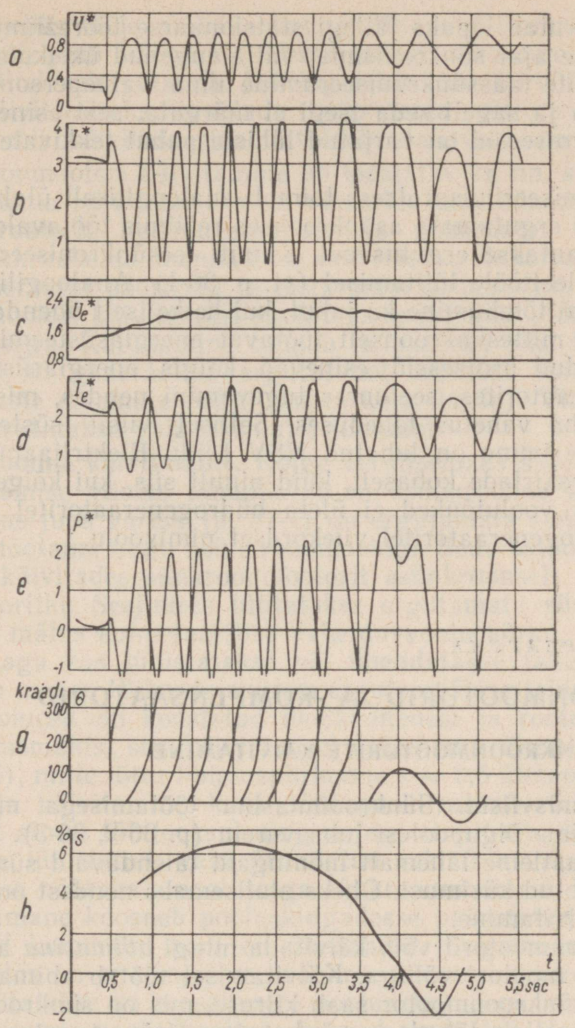
Sünkroniseeriv toime asünkroonses režiimis on loomulikult seda suurem, mida suuremad on vastavad vood ise, s. o. mida suuremad on võrgupinge ja ergutusvool. Sünkroniseerimine toimub kergemini ka väiksemate libistuste ja koormuste puhul. Üsna väikese koormuse juures on nähtavate poolustega sünkroonmasin

suuteline tõmbuma sünkronismi isegi ergutusvoolu puudumisel, ainuüksi reaktiivse momendi toimel. Muide, sellistel juhtudel võib sünkroniseerimine toimuda ka ebaõige polaarsusega ning ergutusvoolu sisselülitamisel nihkub rootor staatori magnetvälja suhtes hüppeliselt ühe poolusjaotuse võrra edasi, millega kaasub ka lühiajaline voolutõuge staatoris.

Üldiselt tuleb arvestada seda, et sünkroniseerimine reaktiivmomendi arvel võib toimuda vaid väikestel koormustel. Pealegi on masin asünkroonses režiimis täiendavalt koormatud suurenenud kaovõimsuse arvel, mis raskendab masina sünkroniseerimist. Seepärast tugevasti koormatud sünkroonmasin pole alati suuteline tõmbuma sünkronismi nendesamade koormuse ja ergutusvoolu väärtuste juures, mis esinesid enne sünkronismist väljalangemist. Eriti kehtib see siis, kui masina asünkroonne moment on nõrk (näiteks hüdrogeneraatorid). Sellistel juhtudel osutub tavaliselt vajalikuks ergutusvoolu suurendamine või koormuse vähendamine, mõnikord isegi mõlema võtte üheaegne kasutamine.

Ülaltoodu illustreerimiseks esitame siin (joon. 37-2) katseandmeist saadud kõverad 50 000-kW turbogeneraatori sünkronismist väljalangemisel, samuti järgneva ergutatud asünkroonse režiimi ning taassünkroniseerumise kohta. Joonisel 37-2, *a* ja *b* on näidatud staatori pinge U ja voolu I kõverad suhtelistes ühikutes, joonisel 37-2, *c*, *d* ja *e* ergutuspinge U_e ja vool I_e ning turbogeneraatori võimsus P samuti suhtelistes ühikutes, joonisel 37-2, *g* ja *h* aga koormusnurga Θ ja libistuse s kõverad. Ajamastaap on kõigil kõveratel ühesugune. Sünkronismist väljalangemine toimus hetkel $t = 0$ võrgus tekkinud lühise tõttu. Lühis kestis ca 0,5 sek., pinge U lühise vältel tublisti langes ja seepärast võrku antav võimsus vähenes. Kuna aga turbiini võimsus jäi endiseks, siis rootori kiirus hakkas kasvama ning tekkiski libistus, mille absoluutväärtus kogu lühise kestel kasvas. Hetkel $t \approx 0{,}5$ sek. lühis võrgus likvideeriti ning masin jäi ergutatud asünkroonsesse režiimi sellele iseloomuliku pingete, voolude ja võimsuse pulseerimisega, mis joonisel 37-2 on väga selgesti näha. Asünkroonrežiimis koormusnurk Θ pinge U ja emj. E vahel pidevalt kasvab, sest rootori kiirus on staatori magnetvälja kiirusest suurem. Joon. 37-2, *g* on nurga Θ suurenemisel üle 360° teda jälle hakatud lugema nullist. Libistus asünkroonrežiimis samuti pulseerib, sest võimsuse P märk vaheldub ning kordamisi esinevad generaatori- ja mootorirežiimid, mis rootorit mõjutavad kord aeglustavalt, kord kiirendavalt.

Joonisel 37-2 esitatud kõverate kohaselt turbogeneraator taassünkroniseerus umbes 4 sek. pärast lühise algust. Vaheajal esines 9 asünkroonset tuiklemise tsüklit. Sünkroniseerumisele aitas kaasa ergutusregulaatori toimel esinenud ergutuspinge U_e ja ergutusvoolu I_e keskväärtuse kasvamine (vt. joon. 37-2, *c* ja *d*), samuti ka võrgupinge taastumine. Masina tõmbumist sünkronismi näitab see, et koormusnurk Θ enam pidevalt ei kasva, vaid võngub teatud kesk-



Joon. 37-2. Kõverad turbogeneraatori sünkronismist väljalangemise, järgneva asünkroonse režiimi ning taassünkroniseerimise kohta

väärtuse ümber, mis vastab turbiinilt saadavale võimsusele. Samuti muutub libistuse keskväärtus pärast sünkronismi tõmbumist nulliks, olles enne seda üldiselt vähenenud.

Koormusnurga Θ võnkumine pärast taassünkroniseerumist tähendab seda, et ka rootori pöörlemiskiirus ei ole päris konstantne. Mainitud võnkumised järk-järgult sumbuvad, mida võib märgata ka joonisel 37-2, *g* ja *h* näidatud kõverate lõpposas, ning

masin saavutab lõpuks jällegi statsionaarse töörežiimi. Tihti toimub lühiste ajal sünkronismist väljalangenud üksikute sünkroongeneraatorite taassünkroniseerumine ilma valvepersonali vahelesegamiseta ja sageli seda isegi ei märgata, sest esinevad iseloomulikud protsessid on varjatud lühiste puhul tekkivate võnkumistega.

Sünkroniseerimisprotsess toimub analoogiliselt ülalvaadelduga ka siis, kui ergutamata asünkroonses režiimis töötavale sünkroonmasinale antakse ergutusvool, samuti isesünkroniseerimise meetodil paralleeltööle lülitamisel (vt. p. 36-1). Analoogiliselt kulgeb sünkronismi tõmbumine ka juhul, kui hetkeliselt ühendatakse kaks isoleeritud mittesünkroonselt töötavat energiasüsteemi osa. Siis ülalvaadeldud protsessid esinevad kõigis energiasüsteemi sünkroongeneraatorites, seejuures tugevamini nendes, mis asetsevad ühenduskoha vahetus läheduses. Sellisel viisil süsteemi osade sünkroniseerimine on lubatud NSV Liidu Elektrijaamade Ministeeriumi eeskirjade kohaselt, kuid ainult siis, kui kõige suuremad võimalikud voolutõuked ei ületa hüdrogeneraatoritel kolmekordset ja turbogeneraatoritel viiekordset nimivoolu.

XXXVIII PEATÜKK

SÜNKROONMOOTORID JA -KOMPENSAATORID

38-1. SÜNKROONMOOTORITE KÄIVITAMINE

Käivitamisviisid. Sünkroonmasina töötamisega mootorirežiimis tutvusime õigupoolest juba varem (p. 36-2, 36-3). Käesolevas peatükis vaatleme lähemalt mõningaid täiendavaid sünkroonmootoritega seotud küsimusi. Üheks olulisemaks nendest on sünkroonmootori käivitamine.

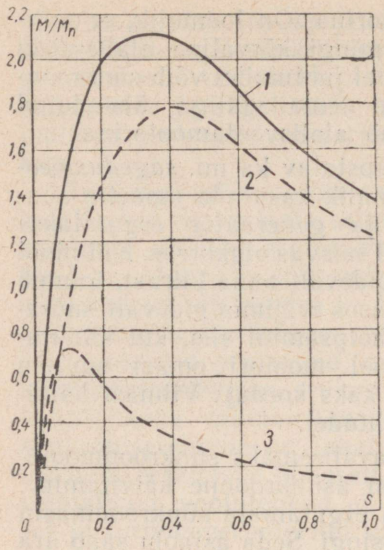
Sünkroonmootorit võib käivitada mingi *abimasina* abil, mis on sidurdatud mootori võlliga. Käivitamisel töötab abimasin mootorina. Kui sünkroonmootor saab kiiruse, mis on sünkroonkiirusega võrdne või sellele lähedane, sünkroniseeritakse ta võrguga samuti nagu sünkroongeneraatorgi, näiteks lampsünkronoskoobi abil või ka isesünkroniseerimise meetodil. Pärast seda võib abimasina tööst välja lülitada. Kirjeldatud käivitusviisi kasutatakse üksikjuhtumitel väga võimsate sünkroonmootorite ja sünkroonkompensaatorite puhul. Abimasinaks on tavaliselt asünkroonmootor, mille võimsuse määravad sünkroonmasina mehaanilised kaod ja mis üldiselt on väike.

Tööstuses kasutatakse mõnikord alalisvoolu allikatena (näiteks akude laadimiseks) ka agregaate, mis koosnevad sünkroonmootorist ja alalisvoolugeneraatorist. Siis on sünkroonmootorit võimalik käivitada ka sellesama generaatori abil, kuni panna ta käivi-

tamisperioodiks tööle alalisvoolumootorina. On loomulik, et sellisel juhtumil peab käepärast olema mingi kõrvaline alalisvoolu allikas (näiteks akupatarei). Mõningatel juhtumitel võib sünkroonmootori käivitamiseks kasutada isegi tema võlliga ühendatud ergutajat, mis käivitusperioodil töötab alalisvoolumootorina.

Sünkroonmootori käivitamine on teostatav ka nn. *sagedusmeetodil,* kui tema käivitamiseks on võimalik kasutada omaette sünkroongeneraatorit. Seejuures mootor ja generaator ergutatakse ja nende ankruahelad ühendatakse veel seisvas olukorras. Kui nüüd panna generaator pöörlema ja tõsta pidevalt tema kiirust, toimub sünkroonmootori käivitamine sünkroonses režiimis pidevalt suureneva kiirusega. Käivitamine toimub hõlpsamini siis, kui käivitamise algul on generaatori ergutusvool mootori omast suurem (samasuguste masinate puhul umbes kaks korda). Viimast käivitusviisi kasutatakse vaid üksikutel juhtudel.

Asünkroonne käivitamine. Kõige tavalisemaks sünkroonmootorite käivitamise viisiks tänapäeval on asünkroonne käivitamine. Nagu selgus juba varem (p. 37-1) on ergutamata sünkroonmasin võimeline töötama nagu asünkroonmasingi. Seda asjaolu saab ära kasutada, käivitades sünkroonmootorit asünkroonselt nagu asünkroonmootoritki. Seejuures lülitatakse ergutamata sünkroonmootori ankru mähis kolmefaasilise vahelduvvoolu võrku, ergutusmähise ahel aga kas lühistatakse või ühendatakse takistiga, mille takistus on umbes 10 korda suurem ergutusmähise takistusest. Kui rootori poolused on koostatud üksiklehtedest ja rootoril asetseb vaid ergutusmähis, siis käivitamisel esineb nn. üheteljeline efekt (vt. p. 30-5), mille tõttu libistuspiirkonna $s \approx 0{,}5$ ületamine on raskendatud ja käivitamine kuni sünkroonkiiruseni võib toimuda praktiliselt ainult tühijooksul ning sedagi ainult siis, kui ergutusmähis pole lühistatud, vaid ühendatud takisti kaudu. Seepärast varustatakse nähtavate poolustega sünkroonmootorid käivitusmähisega. Viimane koosneb pooluskingadesse paigutatud varrastest, mille otsad kummalgi pool on ühendatud rõngaste abil. Selline käivitusmähis on analoogiline asünkroonmootori rootori lühismähisega. Ehitatakse ka massiivsete pooluskingadega sünkroonmootoreid, kusjuures naaberpooluste kingad omavahel otstes ühendatakse vastavate juhtmetega vask- või teraslattide näol. Sellisel juhul moodustavad käivitusmähise pooluskingad ise. Tööstuses leiavad kasutamist ka võimsad kahe poolusega sünkroonmootorid. Need valmistatakse nähtamatute poolustega ja massiivse rootoriga, mis täidavad käivitusmähise ülesannet. Ka ühel või teisel viisil kujundatud käivitusmähistega mootorite puhul asünkroonsel käivitamisel ergutusmähis kas lühistatakse või suletakse takistuse kaudu. Käivitusmähistega varustatud mootorite puhul ei ole üheteljeline efekt praktiliselt märgatav. Kõik sünkroonmootorid, välja arvatud üksikud erandid, ehitatakse arvestusega täispingelisele asünkroonsele käivitusele.



Joon. 38-1. Sünkroonmootori asünkroonne moment (kõver *1*) ja selle komponendid (käivitusmähise moment — kõver *2*, ergutusmähise moment — kõver *3*) takisti kaudu suletud ergutusmähise puhul

Asünkroonsel käivitamisel sünkroonmootor saab kiiruse, mis on lähedane sünkroonsele, kuid loomulikult jääb seejuures teatud libistus. Seejärel antakse ergutusmähisesse ergutusvool ning mootor tõmbub sünkronismi.

Sünkroonmootori käivitusomadusi iseloomustab pöördemomendi kõver $M = f(s)$ (joon. 38-1, kõver *1*), mis on sarnane asünkroonmootori momendi kõveraga. Pöördemoment tekitatakse käivitus- ja ergutusmähises indutseeritud voolude arvel. Vastavalt jaguneb moment kaheks komponendiks, millest ühte võib nimetada käivitusmähise momendiks ja teist ergutusmähise momendiks. Olulisemateks käivitust iseloomustavateks suurusteks, mis tuuakse ka kataloogides, on *algkäivitusmoment* M_k libistusel $s = 1$, *maksimaalne moment* M_{max} ning moment M_s libistusel $s = 0{,}05$ ($s = 5\%$), mida nimetatakse *sisenemismomendiks*. Suurema M_k väärtuse puhul on võimalik sünkroonmootorit käivitada ka suurema koormuse all. Mida suurem on aga moment M_s, seda kergemini tõmbub mootor sünkronismi, sest seda väiksem on siis jääklibistus, mille mootor saavutab asünkroonsel käivitamisel teatud kindla pidurdava momendi juures võllil. Üldiselt on soovitav, et nii M_k, kui ka M_s oleksid suuremad, kuid seejuures esinevad teatud vastuolud, sest käivitusmähise aktiivtakistuse suurendamisel M_k suureneb, M_s aga väheneb ning ümberpöördult. Üldotstarbeliste sünkroonmootorite käivitusmähised kujundatakse tavaliselt selliselt, et täispingel käivitamisel

$$\frac{M_k}{M_n} > \frac{M_s}{M_n} \approx 1{,}0.$$

Samal ajal aga on võimalik ehitada ka suurema algkäivitusmomendiga mootoreid. Üldiselt suurema pöörlemiskiirusega mootorid omavad suuremaid momente M_k ja M_s.

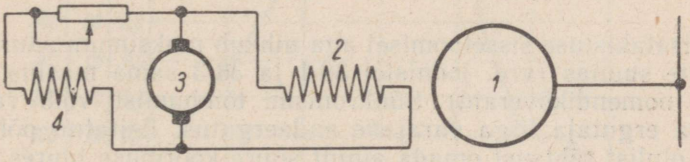
Sünkroonmootorite käivitusvoolu kordsus on üldiselt 4,5 ... 6,5. Käivitamine toimub tavaliselt täispingel ja seda isegi võimsustel kuni 3000 ... 5000 kW. Kui aga selline otsene käivitamine pole

võrgu seisukohalt lubatav, siis kasutatakse reaktori ja üksikutel juhtumitel ka autotrafo abil käivitamist, kusjuures kasutusel on samad skeemid nagu asünkroonmootoritegi puhul (vt. p. 28-5).

Ergutusahelate osas rakendati kuni viimaste aastateni peaaegu eranditult skeemi, mis rajaneb järgmisel põhimõttel. Käivitamise algul mootori ergutusmähis on eraldatud ergutajast ja suletud ergutusmähise 10-kordse takistuse kaudu. Sünkroonkiirusele lähenemisel ($s \approx 0{,}05$) mootori ergutusmähis lülitatakse ümber ergutajale, mootor saab ergutusvoolu ja tõmbub sünkronismi. Ümberlülitamine toimub tavaliselt automaatselt voolu sagedusele ergutusmähises reageeriva relee toimel.

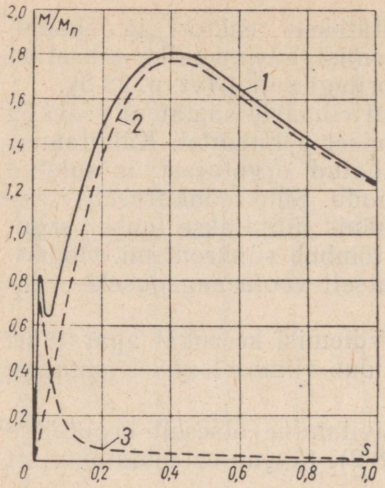
Kirjeldatud käivitusviis nõuab võrdlemisi keerukat aparatuuri ning skeemi ja seepärast on NSV Liidus viimasel ajal kasutusele võetud ka lihtsamaid käivitusviise.

Lihtsaim on sünkroonmootori käivitamine otseselt ergutajale ühendatud ergutusmähisega (joon. 38-2). Seejuures eeldatakse, et



Joon. 38-2. Sünkroonmootori ahelate skeem käivitamisel otseselt ergutajale ühendatud ergutusmähisega:
1 — mootori ankur, *2* — mootori ergutusmähis, *3* — ergutaja ankur, *4* — ergutaja ergutusmähis

ergutaja asub sünkroonmootoriga samal võllil või kuulub eraldi agregaati, mida aga käivitatakse samaaegselt mootoriga. Käivitamise algperioodil ergutaja alalispinget ei arenda, sest endaergutuse tingimused väikese pöörlemiskiiruse tõttu puuduvad. Ergutaja ankrut läbib sünkroonmootori ergutusmähises indutseeritud vahelduvvool, mis aga ergutajale ohtu ei tekita. Kuna ergutaja ankru takistus on suhteliselt väike, siis võib lugeda sünkroonmootori ergutusmähist praktiliselt lühistatuks. Sünkroonkiirusele lähenemisel areneb ergutajas endaergutusprotsess, mootori ergutusmähises tekib ergutusvool ja mootor tõmbub sünkronismi. Vaadeldav käivitusviis on äärmiselt lihtne, ei nõua mingisugust lisaaparatuuri ning sellelt seisukohalt on samaväärne lühisrootoriga asünkroonmootori käivitamisega. Vaadeldud käivitusviisil on aga ka mõningaid puudusi. Üks nendest seisab selles, et lühistatud ergutusmähise puhul on sisenemismoment ($s = 0{,}05$) väiksem kui lisatakistuse puhul ergutusahelas, mistõttu raskeneb sünkronismi tõmbumine. Põhjus seisab selles, et lühistatud ergutusmähise puhul viimase poolt arendatava momendi maksimum esineb väga väikestel libistustel ($s <$

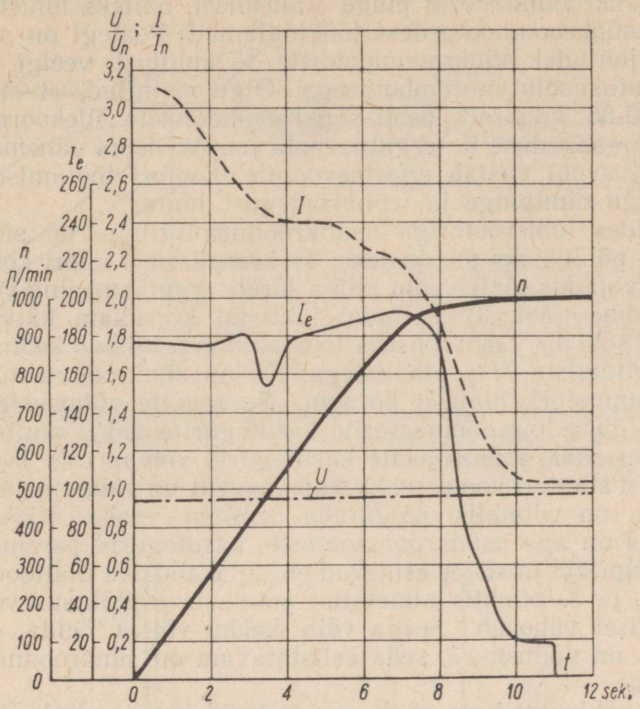


Joon. 38-3. Sünkroonmootori asünkroonne moment (kõver *1*) ja selle komponendid (käivitusmähise moment — kõver *2*, ergutusmähise moment — kõver *3*) lühistatud ergutusmähise puhul

0,05), lisatakistuse sissetoomisel aga nihkub maksimum suuremate libistuste suunas (vrd. joonistel 38-1 ja 38-3 sama masina jaoks toodud momendikõveraid). Sünkronismi tõmbumist võib raskendada ka ergutaja liiga varajane endaergutus. Esitatud põhjused võivad olulist tähtsust omada ainult suure koormuse juures käivitamisel.

Sünkroonmootorite asünkroonse käivitamise probleemi analüüsimisel tuleb silmas pidada ka asjaolu, et käivitamisel eraldub käivitusmähises teatud soojushulk, mis on seda suurem, mida suurem on agregaadi hoomoment ja käivitamisel esinev koormus. Käivitusaeg on üldiselt väike, seega käivitusperioodi vältel märkimisväärset soojuse ülekannet ümbritsevatesse masina osadesse ei toimu ning praktiliselt kogu soojushulk salvestub käivitusmähises ja tõstab tema temperatuuri. Sünkroonmootorite käivitusmähise mass on üldiselt asünkroonmootorite rootorite lühismähiste massist väiksem. Seega raskemate käivitustingimuste puhul võib sünkroonmootori käivitusmähise temperatuur otsesel käivitamisel osutuda lubamatult kõrgeks. Samasugune olukord tekib ka nähtamatute poolustega massiivse rootoriga mootorite puhul, sest tugeva pinnaefekti tõttu eraldub viimastes käivitamisel soojus ainult rootori õhukeses pinnakihis. Sellistel juhtumitel osutub vajalikuks mootori käivitamine madalamal pingel, mispuhul kasutatakse reaktorit või autotrafot. Käivitusaeg seejuures suureneb ning soojusülekanne käivitusmähisest samuti suureneb.

Joonisel 38-4 on toodud võimsa sünkroonmootori (1800 kW, 6,0 kV, 1000 p/min) pinge U, voolu I, kiiruse n ja ergutusmähise voolu I_e ajaline sõltuvus täispingelisel lühistatud ergutusringiga asünkroonsel käivitamisel tühijooksu olukorras. Mootor tõmbus



Joon. 38-4. 1800-kW sünkroonmootori asünkroonse käivitamisprotsessi ajaline kulg

sünkronismi 11 sek. pärast, ilma ergutusvooluta, reaktiivse momendi toimel. Ergutusvoolu sisselülitamisel esinevat protsessi joonisel 38-4 näha ei ole.

38-2. SÜNKROONMOOTORITE OMADUSED

Sünkroonmootorite kasutamine tööstuses järjest laieneb eeskätt seetõttu, et nende võimsustegurit on võimalik ergutusvoolu abil reguleerida soovitud suurusele. ГОСТ 183-55 järgi on sünkroonmootorite nimivõimsustegur $\cos \varphi = 0{,}9$ (mahtuvusliku voolu tarbimisega võrgust). Kuna enamik tarbijaid (asünkroonmootorid) võtavad võrgust induktiivset voolu, siis võimaldab sünkroonmootorite kasutamine võrgu võimsustegurit parandada, mis ongi nende põhiliseks eeliseks.

Sünkroonmootorite positiivseks omaduseks on ka see, et nende pöördemoment on võrdeline võrgu pinge esimese astmega, kuna asünkroonmootorite moment on võrdeline pinge ruuduga. Seepä-

rast on sünkroonmootorid pinge alanemisel, näiteks lühiste puhul võrgus, asünkroonmootoritest töökindlamad. Pealegi on võimalik sellistel juhtudel sünkroonmootorite töökindlust veelgi suurendada ergutusvoolu suurendamisega. Olgu mainitud, et standardi ГОСТ 183-55 kohaselt peab sünkroonmootorite ülekoormatavus nimipinge, -sageduse ja -ergutusvoolu juures olema vähemalt 1,65. Nimiergutusvool vastab ergutusvoolule mootori töötamisel nimikoormusega nimipinge ja -võimsusteguri juures.

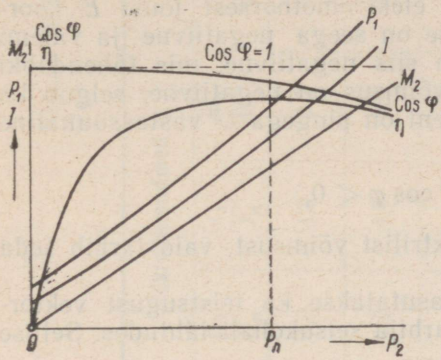
Võrreldes lühisrootoriga asünkroonmootoritega on sünkroonmootorite põhilisteks puudusteks: 1) keerulisem rootori konstruktsioon, 2) vajadus alalisvoolu allika järele ergutusmasina või mõne teise seadme näol, 3) paljudel juhtudel keerukam käivitusviis, 4) vähem sobivus kasutamiseks töörežiimides, mis on seotud sagedate käivitamiste ja peatamistega. Ka on sünkroonmootori hind asünkroonmootori hinnast kõrgem. Suuremate võimsuste puhul sünkroon- ja asünkroonmootorite kasutegurite vahel olulist vahet ei ole ning sünkroonmootorite kasutegurid võivad olla isegi suuremad, sest staatori voolu reaktiivkomponent on väiksem ja rootori mähisesse on võimalik paigutada rohkem vaske. Väiksematel võimsustel on aga asünkroonmootorite kasutegurid paremad, sest puudub ergutaja ja selles esinevad energiakaod. Ka ülaltoodud loetelu 1., 2. ja 3. punktis nimetatud puuduste osatähtsus võimsuse suurenemisel väheneb. Seega võib kokku võttes öelda, et mida suuremad on võimsused, seda eelistatavam on sünkroonmootorite kasutamine.

Kõige sobivamad on sünkroonmootorid kasutamiseks just selliste töömasinate käitamiseks, mis ei vaja sagedat käivitamist, nagu pumbad, ventilaatorid, kompressorid, veskid, mootor-generaatorid jne. Võimsustel üle 100 kW tuleb sellistes seadmetes alati eelistada sünkroonmootoreid. On aga oodata, et sünkroonmootorite kasutusala edaspidi veelgi laieneb, seejuures ka väiksemate võimsuste suunas.

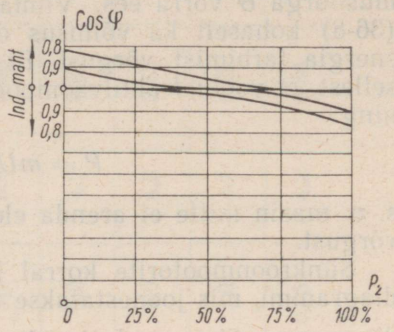
Joonisel 38-5 on toodud sünkroonmootori töökarakteristikud, s. o. tarbitava võimsuse P_1, staatori voolu I, kasuliku momendi M_2, kasuteguri η ja võimsusteguri $\cos\varphi$ sõltuvus kasulikust võimsusest P_2 konstantsete pinge, ergutusvoolu ja sageduse juures. Ergutusvool on valitud sellisena, et tühijooksul $\cos\varphi = 1$. Koormuse suurenemisel $\cos\varphi$ väheneb ja mootor hakkab tarbima reaktiivset võimsust, nagu see selgub ka V-kujulistest kõveratest (vt. joon. 36-16). Momendi M_2 jooneks on sirge, sest $P_2 \equiv nM_2$ ja $n = \text{const}$. Kasuteguri kõver omab tavalist iseloomu.

Joonisel 38-6 on esitatud võimsusteguri sõltuvus kasulikust võimsusest erinevate ergutusvoolude korral. Kõrgemal asetsevad kõverad vastavad suurematele ergutusvooludele. Ordinaatteljel on märgitud staatori voolude iseloom, lähtudes võrgust tarbimise seisukohalt.

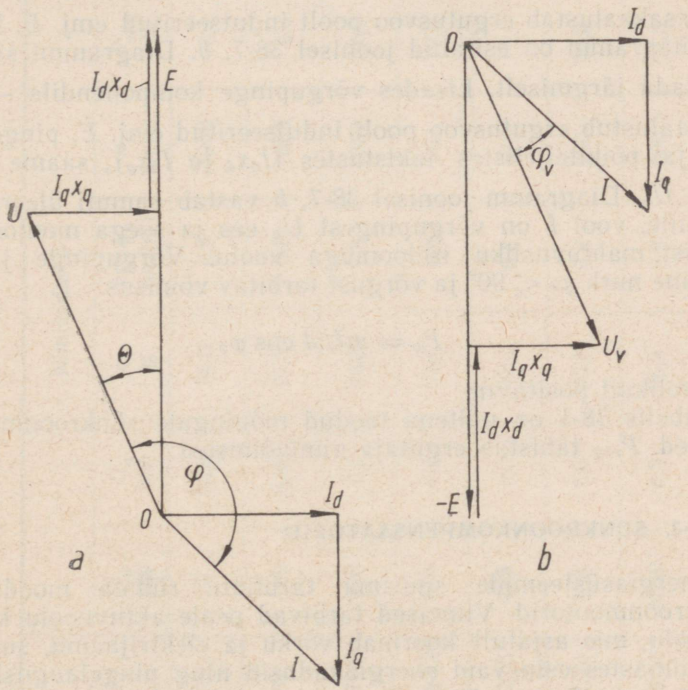
Joonisel 38-7, *a* on esitatud üleergutatud sünkroonmootori



Joon. 38-5. Sünkroonmootori töökarakteristikud



Joon. 38-6. Sünkroonmootori võimsusteguri sõltuvus koormusest mitmesuguste ergutusvoolude korral



Joon. 38-7. Sünkroonmootori vektordiagrammid

vektordiagramm. See on joonestatud samadel põhimõtetel mis generaatorite vektordiagrammidki (vt. p. 33-1). Pingevektor U on ergutusvoo poolt indutseeritud elektromotoorsest jõust E koormusnurga Θ võrra ees. Viimane on seega negatiivne ja valemi (36-8) kohaselt ka võimsus on siis negatiivne, mis tähendabki energia tarbimist võrgust. Et võimsus on negatiivne, selgub ka sellest, et voolu I aktiivkomponent on pingega U vastassuunaline ning

$$P = mUI \cos \varphi < 0,$$

s. o. masin mitte ei arenda elektrilist võimsust, vaid tarbib seda võrgust.

Sünkroonmootorite korral kasutatakse ka teistsugust vektordiagrammi, mis joonestatakse tarbija seisukohalt lähtudes. Sellise diagrammi võime saada joonise 38-7, *a* põhjal, kui seal vektorid $\dot{U}$ ja $\dot{E}$ pöörame 180° võrra. Masina pinge $\dot{U}$ asemel saame siis võrgupinge $\dot{U}_v$, mis on masina pingega võrdne, kuid suunalt vastupidine. Samuti saame emj. $\dot{E}$ asemel võrgupinge komponendi $-\dot{E}$, mis tasakaalustab ergutusvoo poolt indutseeritud emj. $\dot{E}$. Nii saadav diagramm on esitatud joonisel 38-7, *b*. Diagrammi sisu võib selgitada järgmiselt. Lisades võrgupinge komponendile $-\dot{E}$, mis tasakaalustub ergutusvoo poolt indutseeritud emj. $\dot{E}$, pingelangud piki- ja põikiteljelistes takistustes ($I_d x_d$ ja $I_q x_q$), saame võrgupinge $\dot{U}_v$. Diagramm joonisel 38-7, *b* vastab samuti üleergutatud režiimile, vool I on võrgupingest U_v ees ja seega mootor tarbib võrgust mahtuvusliku iseloomuga voolu. Võrgupinge ja voolu vaheline nurk $\varphi_v < 90°$ ja võrgust tarbitav võimsus

$$P_v = mU_v I \cos \varphi_v$$

on järelikult positiivne.

Tabelis 38-1 on näitena toodud mõningate sünkroonmootorite andmed. P_{erg} tähistab ergutaja nimivõimsust.

38-3. SÜNKROONKOMPENSAATORID

Energiasüsteemide suurima tarbijate rühma moodustavad asünkroonmootorid. Viimased tarbivad peale aktiivvoolu ka reaktiivvoolu, mis asjatult koormab võrku ja elektrijaamu, suurendades viimastes esinevaid energiakadusid ning pingelangusid. Seepärast on võrgu võimsusteguri parandamine väga tähtsaks majanduslikuks ülesandeks. Võimsusteguri parandamiseks kasutatakse tehaste alajaamades viimasel ajal üha laialdasemalt kon-

Tabel 38-1

Sünkroonmootorite andmeid

Tüüp	Nimiandmed						Käivitusandmed				
	P_n kW	U_n kV	η_n %	$\cos \varphi_n$ (maht.)	n_n p/min	P_{erg} kW	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{U_k}{U_n}$	$\frac{I_k}{I_n}$	$\frac{M_k}{M_n}$	$\frac{M_s}{M_n}$
CM 11-4-6	57	0,38	89,0	0,8	1000	3,1	2,2	1,0	4,5	2,2	0,8
CM 12-7-6	160	0,38	91,9	0,8	1000	4,3	2,4	1,0	4,9	2,4	0,8
MC 321-10/6	990	6,0	94,6	0,8	1000	17,0	2,25	1,0	5,4	0,66	0,66
MC 321-8/12	370	6,0	91,8	0,8	500	13,5	2,75	1,0	4,2	0,68	0,68
MC 322-7/16	445	6,0	92,0	0,8	375	13,6	2,75	1,0	4,8	0,68	0,68
MC 323-7/24	460	6,0	90,8	0,8	250	20,0	2,60	1,0	4,2	0,69	0,69
MC 324-20/10	6650	6,0	96,8	0,8	600	67,5	2,38	0,75	4,2	0,36	0,36

densaatoreid, mille eeliseks on väikesed energiakaod. Kuid kondensaatoreid ei ole võimalik ehitada suurtele näivvõimsustele ja nad on ikka veel suhteliselt kallid (6 ... 25 rbl./kVA). Samal ajal aga tekib sageli vajadus suurte reaktiivvõimsuste kompenseerimiseks ja pinge reguleerimiseks energiasüsteemi võimsamates alajaamades. Selleks otstarbeks kasutatakse sünkroonkompensaatoreid.

Sünkroonkompensaator on oma olemuselt tühijooksurežiimis töötav sünkroonmootor, mille ergutusvoolu reguleeritakse nii, et ta olenevalt süsteemi töörežiimist annaks võrku või tarbiks sealt vajaliku suurusega reaktiivvoolu (vt. p. 36-2). Sünkroonkompensaatorina võib kasutada tavalisi sünkroongeneraatoreid, samuti -mootoreid. Näiteks hüdroelektrijaamades viiakse vähese vee perioodidel mõnikord osa generaatoreid kompensaatorite režiimi. Tavaliselt aga kasutatakse kompensaatoritena eriti selleks otstarbeks ehitatud masinaid. Nõukogude Liidus ehitatakse sünkroonkompensaatoreid näivvõimsustele kuni 75 000 kVA ja pingetele kuni 11 000 V.

ГОСТ 609-54 kohaselt varustatakse sünkroonkompensaatorid käivitusmähisega asünkroonseks käivitamiseks täispingel. Vajaduse korral, kui võrk on nõrk, käivitatakse kompensaatoreid ka abimootori abil (vt. p. 38-1), milleks kasutatakse vajaliku võimsusega asünkroonmootorit. Kuna sünkroonkompensaator ei oma koormust võllil, võib ta olla valmistatud hoopis ilma väljatoodud võlliotsata, mis kergendab kinnise ventilatsioonisüsteemi kujundamist ja muuseas ka vesinikjahutuse kasutamist.

Kuna sünkroonkompensaator ei ole koormatud aktiivvõimsusega, siis paralleeltöö stabiilsus ei kujuta tema juures mingit probleemi. Järelikult on võimalik sünkroonkompensaatoreid ehitada väiksema õhupiluga ja seega suurema pikiteljelise sünkroontakistusega x_d kui sünkroongeneraatoreid ja -mootoreid. Tingituna sellest võib kompensaatoreid ehitada nõrgema ergutusmähisega, mis omakorda vähendab kompensaatori hinda.

Võrgu võimsusteguri kompenseerimise seisukohalt on tavaliselt ainult vajalik, et sünkroonkompensaator töötaks üleergutatud režiimis (vt. p. 36-2) ja annaks võrku reaktiivvõimsust (induktiivset voolu), olles seega reaktiivvõimsuse generaatoriks. Võrgupinge reguleerimise seisukohalt osutub aga ka mõnedes olukordades vajalikuks kompensaatori töötamine alaergutatud režiimis, millal ta tarbib võrgust reaktiivvõimsust (induktiivset voolu). ГОСТ 609-54 kohaselt loetakse sünkroonkompensaatori nimivõimsuseks tema maksimaalset lubatavat näivvõimsust üleergutatud režiimis, kusjuures maksimaalne võimalik näivvõimsus alaergutatud režiimis moodustab 50% nimivõimsusest. Sünkroonkompensaator üleergutatult käitub võrgu suhtes nagu kondensaator, alaergutatult aga nagu paispool.

Võimsad sünkroonkompensaatorid varustatakse tavaliselt automaatsete ergutusregulaatoritega, mille ülesandeks on reguleerida

ergutusvoolu nii, et pinge kompensaatori klemmidel ja seega ka vastavas võrgu punktis jääks konstantseks. Sellega tagatakse tarbijate seisukohalt parim pingete režiim ning ühtlasi tagatakse suuremal määral süsteemi stabiilsed töörežiimid.

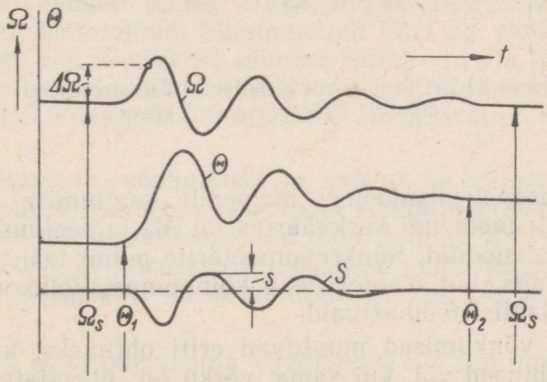
Olgu tähendatud, et mõnikord püütakse tehastes võimsusteguri parandamise otstarbel kasutada väikese võimsusega sünkroonkompensaatoreid. Sellist lahendust ei saa lugeda otstarbekaks, sest niisugustes kompensaatorites esinevad suhteliselt suured energiakaod. Parem on seal staatiliste kondensaatorite kasutamine, suuremate asünkroonmootorite asendamine üleergutatud režiimis töötavate sünkroonmootoritega jne.

XXXIX PEATÜKK

SÜNKROONMASINATE VÕNKUMINE

39-1. SÜNKROONMASINATE VÕNKUMISTE FÜÜSIKALINE OLEMUS

Sünkroonmasina võnkumise all mõistetakse tema rootori pöörlemist perioodiliselt ebaühtlase kiirusega. Võnkumisel rootori kiirus kõigub teatud sagedusega kiiruse keskväärtuse ümber. Kui sünkroonmasin töötab paralleelselt võrguga, mida tavaliselt tulebki arvestada, siis koos masina rootori kiiruse võnkumisega muutub ka koormusnurga Θ suurus, sest näiteks sünkroongeneraatori rootori kiiruse suurenemisel ergutusvoo poolt indutseeritud emj. E vektor tõttab võrgupinge vektorist U kaugemale ette ja vastupidi. See asjaolu selgub ka generaatori vektordiagrammist (vt. näit. joon. 36-9). Koormusnurga Θ kõikumisega on aga vältimatult seotud masina võimsuse ja ankru voolu kõikumised (nurga



Joon. 39-1. Sünkroonmasina nurkkiiruse Ω ja koormusnurga Θ võnkumine

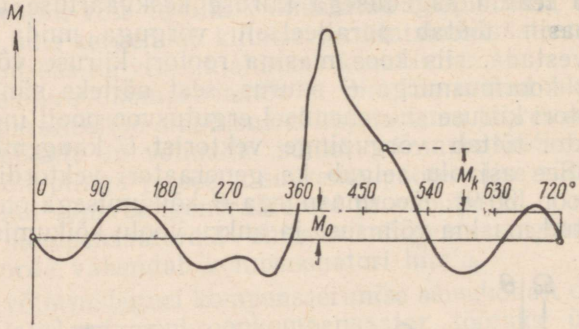
Θ suurenemine tähendab ka võimsuse suurenemist ja vastupidi). Seega sünkroonmasina teatud sagedusega võnkumine väliselt ilmneb tema võimsuse ja voolu tuikamises. Mida suurem on rootori kiiruse võnkumise aplituud, seda suurem on ka võimsuse ja voolu tuikamise amplituud.

Joonisel 39-1 on toodud sünkroongeneraatori rootori nurkkiiruse Ω ja koormusnurga Θ sõltuvus ajast sumbuva võnkumise puhul. Keskmine nurkkiirus Ω_s on seejuures konstantne ja vastab sünkroonkiirusele.

Sünkroonmasinate võnkumised mõningates olukordades osutuvad vältimatuteks. Samal ajal võivad sellised võnkumised tõsiselt häirida nii üksikute sünkroonmasinate kui ka kogu energiasüsteemi tööd. Seepärast on vaja nende võnkumiste olemust lähemalt tundma õppida.

Eristatakse *sünkroonmasina sunnitud* ja *vabu võnkumisi.*

Sunnitud võnkumised. Sünkroonmasina sunnitud võnkumine esineb juhul, kui mehaaniline moment tema võllil ei ole konstantne, vaid omab pulseerivat komponenti. Generaatorite juures leiab see aset siis, kui jõumasinaks on kolbaurumasin või sisepõlemismootor. Joonisel 39-2 on näitena esitatud ühesilindrilise nel-



Joon. 39-2. Ühesilindrilise neljataktilise sisepõlemismootori pöördemomendi kõver

jataktilise sisepõlemismootori momendi muutumise kõver kahe pöörde vältel; momendi keskväärtus on M_0 ja seejuures esinevad tugevad pulsatsioonid. Sünkroonmootorite puhul tekivad sunnitud võnkumised siis, kui mootor veab kolbpumpa, kolbkompressoreid ja teisi selletaolisi töömasinaid.

Sunnitud võnkumised muutuvad eriti ohtlikeks, kui esinevad resonantsinähtused või kui sama võrku on ühendatud kaks või enam sunnitult võnkuvat sünkroonmasinat ja nende võnkumissagedused langevad kokku või on kordsed. Näiteks esineb mõni-

kord raskusi diiselmootoriga ühendatud sünkroongeneraatorite paralleeltöö realiseerimisel.

Sunnitud võnkumiste ja nende mõju vähendamiseks kasutatakse hoorattaid. Mõnikord monteeritakse hooratas sünkroonmasina rootori külge või valmistatakse rootor ise sihilikult suurema hoomomendiga (suurem läbimõõt ja mass). Sellist võtet kasutatakse näiteks *diiselgeneraatorite* korral, s. o. sünkroongeneraatoritel, mis on määratud ühendamiseks diiselmootoritega.

Vabad võnkumised. Sünkroonmasina vabad võnkumised on tingitud tema enda omadustest, sest paralleeltööl võrguga või teiste sünkroonmasinatega kujutab ta võnkuvat süsteemi. Selle küsimuse paremaks selgitamiseks vaatleme esialgu tavalist mehaanilist võnkuvat süsteemi, sest on võimalik näidata täielikku analoogiat puhtmehaanilise võnkuva süsteemi ja sünkroonmasina kui võnkuva süsteemi vahel.

Mehaanilises süsteemis esinevad võnkumised siis, kui temas eksisteerivad nii *inerts-* kui ka *elastsusjõud.* Lihtsaimaks selliseks süsteemiks on vedru koos selle otsa riputatud raskusega. Süsteemi mass kiirendatud liikumisel kutsub esile inertsjõu, mis on võrdeline massiga ja kiirendusega ehk läbitud tee pikkusega teise tuletisega aja järgi. Elastsusjõud on tingitud vedrust, selle deformatsioonist. Kui kirjeldatav süsteem oma tasakaaluasendist järsu häire tekitamisega välja viia näiteks vedrule lisaks veel mingi raskuse otsariputamise teel, siis tekib süsteemi võnkumine. Viimane toimub süsteemi uue tasakaaluasendi suhtes ning võnkumist mõjutav elastne jõud on võrdeline raskuskeskme kaugusega (teepikkusega) uuest tasakaalupunktist. Uus tasakaaluasend on määratud häire (lisaraskuse) suurusega ja elastse jõu iseloomuga (vedru jäikusega). Lõppude lõpuks võnkumine sumbub ja süsteem jääb paigale uues tasakaaluasendis. Sumbumine toimub *summutavate jõudude* toimel. Vaadeldavas süsteemis on viimasteks peamiselt hõõrdejõud. Summutavad jõud on võrdelised liikumise kiirusega ehk teepikkuse esimese tuletisega aja järgi. *Võnkumise sagedus* on seda väiksem, mida suurem on mass ja mida lõdvem on vedru. *Võnkumise amplituud* on määratud häire suurusega.

Sünkroonmasina võnkumisel ja samuti ka igasuguste teiste võnkumiste puhul (näiteks elektrivoolu võnkumine elektriahelas L, C, r) esinevad täiesti analoogilised jõud, samuti viimaste sõltuvused teepikkusest ja kiirusest või nendele vastavatest suurustest. Ka võnkumise sageduse ja amplituudi suhtes võib leida täielikku analoogiat.

Inertsjõud sünkroonmasina võnkumisel on tingitud tema rootori massist, õigemini tema hoomomendist. Elastseteks jõududeks on staatori ja rootori vahel tegutsevad elektromagnetilised jõud. Need jõud püüavad hoida rootorit viimase liikumisel suhtelises

tasakaaluasendis, s. t. sellise koormusnurga Θ juures, mille puhul masina elektriline võimsus ja mehaaniline võimsus võllil on tasakaalus. Kui see tasakaal rikutakse ja nurk Θ muutub mingi suuruse $\Delta\Theta$ võrra, siis tekivad sellised elektromagnetiliste või elastsete jõudude muutused, mis püüavad tasakaalu taastada ning muuta $\Delta\Theta$ nulliks. Roteeriva keha puhul, nagu seda on sünkroonmasina rootor, tuleb jõudude asemel sisuliselt vaadelda pöördemomente. Seega *«elastseks» momendiks* sünkroonmasinas on meile varemast tuntud (vt. p. 36-4) sünkroniseeriv moment. See moment on väikeste koormusnurga $\Delta\Theta$ muutuste puhul viimasega võrdeline, samuti nagu vedru elastne jõud on võrdeline tema deformatsiooniga. Elastsete jõudude tekitajaks või kandjaks sünkroonmasinas on seega rootorit ja staatorit ühendav magnetvoog ning seda võib võrrelda vedruga. Siinkohal tuletame veel kord meelde, et sünkroniseeriv moment saab tekkida ainult sünkroonmasina paralleeltööl võrguga, mitte aga iseseisval tööl, vastavalt ka sünkroonmasina vabad võnkumised esinevad ainult paralleeltööl võrguga.

Sünkroonmasinate võnkumistel esinevad ka *summutavad momendid.* Hõõrdejõud laagrites ja õhus on tühised, sest sünkroonmasinate võnkumine toimub võrdlemisi aeglaselt. Oluliseks summutavaks momendiks on sünkroonmasina asünkroonne moment. Kuna võnkumiste puhul rootori pöörlemiskiirus on vaheldumisi sünkroonkiirusest suurem ja väiksem (vt. joon. 39-1), siis esineb muutuv libistus, mis isegi vahetab oma märki. Libistus on seejuures võrdeline koormusnurga $\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta$ muutumise kiirusega:

$$s = -\frac{d\Theta}{\Omega_s dt} = -\frac{d(\Delta\Theta)}{\Omega_s dt}.$$

Kui kiirus on sünkroonne, siis $\Theta = \text{const}$ ja $s = 0$; kiiruse kasvamisel sünkroonsest suuremaks suureneb ka Θ ja libistus muutub negatiivseks jne.

Rootori ahelates (ergutus- ja summutusmähis, massiivsed magnetahela osad) indutseeritakse liikumisel libistusega ankruvoo suhtes voolud ja tekib rootorit mõjutav pöördemoment, milleks ongi sünkroonmasina asünkroonne moment (vt. p. 37-1, 38-1). See moment toimib võnkumiste puhul alati viimaste summutamise suunas: kui kiirus on sünkroonsest suurem (asünkroongeneraatori režiim), mõjub ta rootorit pidurdavalt, on aga kiirus sünkroonsest väiksem (asünkroonmootori režiim), siis mõjub asünkroonne moment rootorit kiirendavalt. Samasuguse iseloomuga summutav moment tekib ka põhjusel, et rootori võnkumise tõttu indutseerib ergutusvoog ankru mähises lisavoole, mille sagedus erineb põhisagedusest ja on seotud võnkumissagedusega. Nende voolude ja ergutusvoo koostoimel tekibki täiendav rootori liikumist summutav moment.

Libistused sünkroonmasinate võnkumistel on tavaliselt suhteliselt väikesed ($s < 0{,}05$), sest rootor omab küllaltki suurt mehaanilist inertsi ja kiiruse hetkeline erinevus sünkroonsest võnkumiste juures ei saa olla eriti suur. Väikeste libistuste puhul on asünkroonne moment võrdeline libistusega. Seega ka summutav moment sünkroonmasinas on tõepoolest võrdeline libistusega või nurga Θ ehk $\Delta\Theta$ tuletisega.

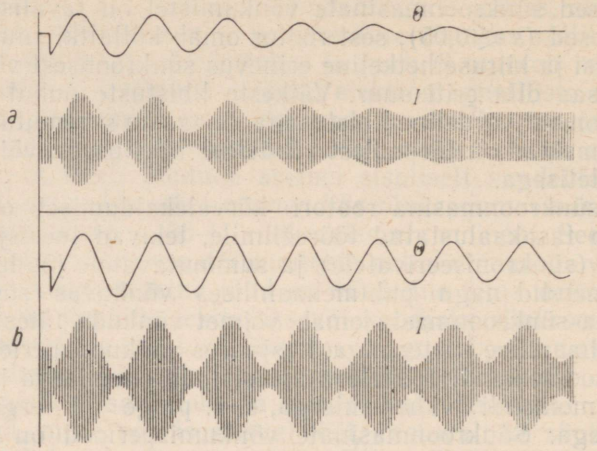
Seega sünkroonmasina rootori kõrvalekaldumisel olukorrast, mis vastab tasakaalustatud töörežiimile, tekivad inertsjõududele, elastsetele (sünkroniseerivatele) ja summutavatele jõududele vastavad momendid nagu puhtmehaanilises võnkuvas süsteemiski. Tulemusena sünkroonmasin omab võimet võnkuda täiesti analoogiliselt mehaanilise süsteemiga, kusjuures võnkumisperiood suureneb koos hoomomendi (pöörleva massi) suurenemisega ja sünkroniseeriva momendi vähenemisega, s. o. pinge ja ergutusvoolu vähenemisega. Sünkroonmasinate võnkumisperiood on tavaliselt 0,5 ... 3 sek. (suurematel masinatel vastavalt suurem). Mida suurem on summutav moment, seda kiiremini võnkumised sumbuvad. Pooluskingadesse paigutatud summutusmähise olemasolul kasvab summutav moment mitmekordselt ja tulemusena see mähis on tõhusaks summutavaks vahendiks, millest tuleneb tema nimetuski.

Summutusmähis vähendab ka sunnitud võnkumiste amplituudi, mistõttu näiteks kõik diiselgeneraatorid varustatakse sellise mähisega. Vajaduse korral varustatakse summutusmähisega ka hüdrogeneraatorid. Turbogeneraatoritel täidab summutusmähise ülesannet massiivne rootori keha, sünkroonmootoritel käivitusmähis.

Joonisel 39-3 on toodud sama sünkroonmasina koormusnurga Θ ja ankru voolu I võnkumiste kõverad summutusmähise olemasolul (*a*) ja selle puudumisel (*b*).

Sünkroonmasina vabad võnkumised tekivad järskude häirete puhul, näiteks töörežiimi järsul muutumisel, kui kaob tasakaal masina elektrilise ja mehaanilise võimsuse vahel ning tasakaalu taastamiseks peab muutuma koormusnurk Θ. Kõige sagedamini on praktikas võnkumiste tekkimise põhjuseks niisugused nähtused, nagu järsk koormuse muutus, pinge langemine masina klemmidel — tingituna lühisest võrgus, järsk ergutusvoolu muutumine jne. Võnkumise amplituud on määratud sellise häire suurusega. Joonisel 39-1 esitatud võnkumise juhtum vastab sünkroongeneraatori võimsuse suurenemisele või klemmipinge langemisele, mistõttu toimub üleminek uude töörežiimi suurema koormusnurga juures. Joonise 37-2 parempoolses osas on ka märgata sünkroonmasina elektriliste ja mehaaniliste suuruste võnkumist, mille tingis generaatori tõmbumine sünkronismi.

Sünkroonmasinate võnkumised, kui nad oma amplituudilt on suured ja sumbuvad halvasti, häirivad tõsiselt energiasüsteemi tööd ja põhjustavad isegi üksikute masinate sünkronismist välja-



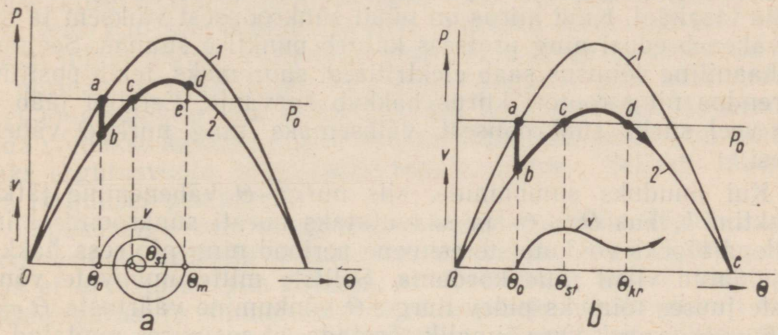
Joon. 39-3. Sünkroongeneraatori vabad võnkumised summutusmähise olemasolul (*a*) ja selle puudumisel (*b*)

langemist. Eriti ohtlikud olukorrad võivad tekkida suurte häirete puhul energiasüsteemis (lühised kõrgepingeliinides, üksikute liinide, alajaamade ja jaamade väljalülitamine jne.). Väga ohtlikuks kujuneb olukord ka sünkroonmasina sunnitud võnkumistel, kui nende võnkumiste sagedus on lähedane omavõnkesagedusega. Niisugust võimalust tuleb kindlasti vältida. Seetõttu tuleb ekspluatatsioonis võnkumise küsimustele osutada küllaldast tähelepanu.

Peale vaadeldud võnkumiste tekivad teatud juhtudel sünkroonmasinates veel võnkumised n.-ö. iseendast, ilma väliste põhjusteta. Sellised võnkumised võivad esineda paralleeltöös võrguga tühijooksul või väikesel koormusel, kui ankru ahela takistus on võrdlemisi suur, ning omavad sel juhul püsivat iseloomu. Seejuures tekib võnkumine kergemini mootorirežiimis ning võnkumiste amplituud suureneb ergutusvoolu suurendamisel. Praktikas tuleb niisuguste võnkumiste tekkevõimalustega arvestada väikese võimsusega masinate puhul (kuni mõnikümmend kilovatti). Summutusmähis vähendab ka selliste võnkumiste amplituudi ning võib nad isegi täiesti kõrvaldada. Vaadeldavate võnkumiste põhjused on üsna keerulised ning nende lähem analüüs ei ole siin võimalik. Võib tähendada ainult seda, et suure ankrutakistuse puhul esinevad võnkumistel pöördemomendi sellised komponendid, mis võnkumisi ei summuta, vaid tugevdavad. See asjaolu ongi vaadeldavate võnkumiste tekke põhjuseks.

Sünkroonmasina dünaamiliseks stabiilsuseks nimetatakse tema võimet säilitada sünkroonset paralleeltöö režiimi suurte ja järskude häirete puhul. Siinkohal tutvume selle küsimusega lühidalt konkreetse näite analüüsi alusel.

Oletame, et sünkroongeneraator töötas statsionaarses töörežiimis paralleelselt võrguga teatud kindla pinge ja ergutusvoolu väärtuste juures, millele vastab joonisel 39-4, *a* näidatud koormuskarakteristik *1*. Turbiinilt saadav võimsus olgu P_0, mis jääb kons-



Joon. 39-4. Sünkroongeneraatori dünaamiliselt stabiilne (*a*) ja dünaamiliselt mittestabiilne (*b*) järsk töörežiimi muutus

tantseks. Niisugusele töörežiimile vastab koormuskarakteristikul *1* punkt *a* ja koormusnurk Θ_0. Oletame nüüd, et võrgus toimub lühis, mille tõttu pinge generaatori klemmidel langeb ning seoses sellega koormuskarakteristiku kõver muutub (kõver *2* joonisel 39-4, *a*), kulgedes madalamalt. Rootori inertsi tõttu koormusnurk järsult muutuda ei saa ning esimesel hetkel jääb see endiseks. Seejuures generaator läheb üle uude töörežiimi, millele vastab punkt *b* kõveral *2*. Järelikult generaatori poolt arendatav elektriline võimsus väheneb. Kuna turbiini poolt arendatav mehaaniline võimsus jääb samaks, siis rootorit kiirendatakse, tema kiirus kasvab sünkroonsest suuremaks ning ka nurk Θ hakkab kasvama. Vastavalt generaatori töörežiimi muutumisele nihkub ka tööpunkt kõveral *2* punktist *b* punkti *c* poole.

Punktis *c* saab elektriline võimsus jälle võrdseks mehaanilise võimsusega, kuid rootori kiirus on sünkroonsest suurem ja seega nurk Θ kasvab edasi punkti *d* suunas. Elektriline võimsus saab nüüd mehaanilisest suuremaks ning seega tekib negatiivne kiirendus. Rootori kiirus hakkab vähenema, kuid esialgu jääb ta ikkagi suuremaks sünkroonsest ning nurk Θ kasvab veelgi edasi — kuni

lõpuks punktis d kiirus muutub jälle sünkroonseks. Seejuures $\theta = \theta_m > \theta_0$.

Joonise 39-4, *a* alumises osas on näha rootori tegeliku ning sünkroonkiiruse vahe v kõver, mille ülemine kaar punktist $\theta = \theta_0$ kuni punktini $\theta = \theta_m$ kujutab kiiruste vahe v muutumist vastavalt äsjakirjeldatule.

Kuigi punktis d on kiirus sünkroonne, osutub elektriline võimsus siiski mehaanilisest suuremaks ja rootor aeglustub, kiirus muutub sünkroonsest väiksemaks, v muutub negatiivseks ning nurk θ hakkab vähenema. Seega tööprotsessi iseloomustav punkt hakkab tagasi pöörduma punkti c poole, kus saabub jälle võimsuste tasakaal. Kuid kiirus on nüüd sünkroonsest väiksem ja nurk θ väheneb edasi ning protsess kulgeb punkti b suunas. Seejuures mehaaniline võimsus saab elektrilisest suuremaks, tekib positiivne kiirendus ning rootori kiirus hakkab kasvama. Esialgu jääb kiirus veel siiski sünkroonsest väiksemaks ning nurk θ väheneb edasi.

Kui puuduks sumbumine, siis nurga θ vähenemine jätkuks punktini b, kus $\theta = \theta_0$ ja saavutataks uuesti sünkroonne kiirus. Sellega lõpeks võnkumiste esimene periood ning protsess hakkaks kirjeldatud viisil jälle korduma. Selliste mittesumbuvate võnkumiste juures toimuks pidev nurga θ võnkumine väärtuste $\theta = \theta_0$ ja $\theta = \theta_m$ vahel. On võimalik tõestada, et seejuures pindalad *abc* ja *cde,* mis iseloomustavad võnkumistest tingitud rootori kineetilise energia muutusi, peavad olema võrdsed.

Tegelikult võnkumised sumbuvad (vt. p. 39-1) ning kiirus saavutab esimese perioodi lõpul sünkroonse väärtuse ($v = 0$) uue nurga $\theta > \theta_0$ juures (vt. joon. 39-4, *a, v* kõvera teine kaar allpool abstsisstelge). Samadel põhjustel ka järgmisel võnkumise perioodil on nurga θ maksimaalne väärtus väiksem kui θ_m. Võnkumiste amplituud niiviisi järk-järgult väheneb ning lõpuks saabub punktis c uus statsionaarne töörežiim. Seejuures on vaadeldud juhul esineva töörežiimi muutuse korral dünaamiline stabiilsus kindlustatud, kuigi võnkumiste puhul koormusnurk võib osutuda kriitilisest suuremaks (vt. joon. 39-4, *a*). Teistel juhtumitel võib generaator võnkumiste jooksul sünkronismist välja langeda ning seega dünaamiline stabiilsus ei ole tagatud.

Joonisel 39-4, *b* on toodud juhtum, mis on analoogiline joonisel 39-4, *a* esitatule, kuid siin on oletatud sügavamat pinge langemist lühisel ning seepärast kõver *2* asetseb veelgi madalamal. Generaatori töörežiim koormuskarakteristikul *2* muutub jälle punktide *c, d* suunas. Nüüd kolmnurk *abc*, mis iseloomustab rootori kiirendusperioodi vältel esinevat rootori kineetilise energia suurenemist, on oma pindala poolest suurem joone P_0 peal kaarega *cd* piiratud kujundi pindalast, mis iseloomustab rootori kineetilise energia vähenemist aeglustumise perioodil. Seepärast punktis d jääb

kiirus veel suuremaks sünkroonsest ja nurga θ suurenemine jätkub. Sellest tingituna generaatori töörežiim nihkub edasi kaarele *de*. Seejuures mehaaniline võimsus muutub elektrilisest suuremaks, tekib rootori kiirenemine ning nurk θ ei vähene, vaid hakkab kasvama veelgi kiiremini. Tulemusena generaator langeb sünkronismist välja.

Siinkohal ei ole võimalik lähemalt käsitleda mitmesuguseid sünkroonmasinate dünaamilise stabiilsuse kindlustamise küsimusi, mis kuuluvad energiasüsteemide ekspluatatsiooni ja töörežiimide valiku valdkonda. Olgu ainult märgitud, et üheks tõhusamaks dünaamilise stabiilsuse kindlustamise abinõuks on võrgus esineva lühise kiire likvideerimine vastava liini või seadme väljalülitamise teel. Kui see toimub küllalt kiiresti, 0,1 ... 0,3 sek. vältel pärast lühise algust, mille järel normaalne pinge taastub, siis võib ka normaalne sünkroonne töörežiim taastuda, sest koormusnurk θ ei jõua lühikese aja vältel kasvada kuigi suureks. Abinõudest, mida võidakse kasutada sünkroonmasinate endi juures, on tähtsaimaks ergutusvoolu automaatne reguleerimine. Sellest lähemalt aga järgmises peatükis.

Lõpuks olgu veel märgitud, et antud peatükis käsitleti sünkroonmasinate võnkumise küsimusi tunduvalt lihtsustatult. Muuseas ei arvestatud siin asjaolu, et võnkumiste puhul indutseeritakse ergutus- ja summutusmähises lisavoole, mis tunduvalt mõjutavad masinate koormuskarakteristikuid. Korrektne sünkroonmasinate võnkumiste ja stabiilsuse küsimuste uurimine on väga komplitseeritud ülesanne ning nõuab keeruliste diferentsiaalvõrrandite süsteemide lahendamist ja uurimist. Seoses võimsate energiasüsteemide loomisega on tänapäeval neid küsimusi nii Nõukogude Liidus kui ka teistes riikides tõsiselt uuritud ning saadud tulemusi ka praktikas rakendatud.

XL PEATÜKK

SÜNKROONMASINA ERGUTUSSÜSTEEMID JA ERGUTUSE REGULEERIMINE

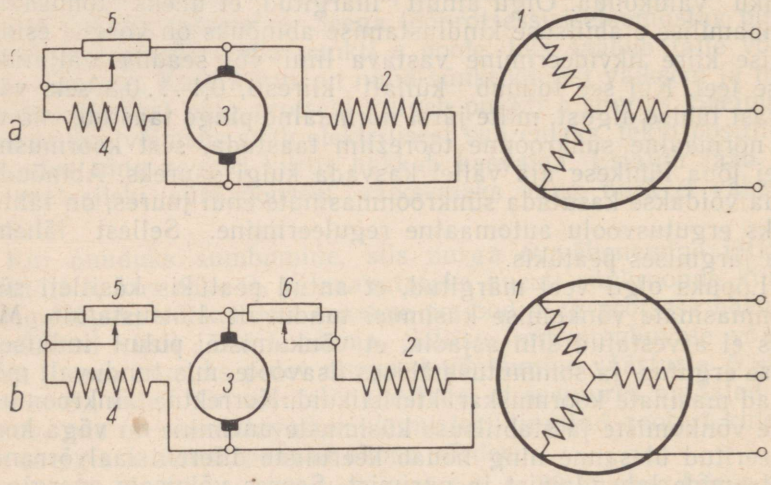
40-1. SÜNKROONMASINATE ERGUTUSSÜSTEEMID

Normaalne sünkroonmasin vajab ergutusmagnetvoo tekitamiseks alalisvoolu, mida võib saada eriti selleks otstarbeks ettenähtud alalisvoolugeneraatorist. Viimast nimetatakse siis ergutusmasinaks või lihtsalt ergutajaks. Viimasel ajal kasutatakse üha sagedamini ka teistsuguseid ergutussüsteeme.

Ergutussüsteemide hindamise aluseks on töökindlus, lihtsus ja odavus. Energiasüsteemide töörežiimide stabiilsuse saavutamiseks reguleeritakse võimsate sünkroongeneraatorite ergutusvoolu

automaatselt, mis ergutussüsteemidele esitab veel mõningaid lisanõudeid.

Ergutussüsteemid alalisvoolumasinatega. Klassikaliseks sünkroonmasina ergutussüsteemiks, mida kasutatakse tänapäevani väga laialdaselt, on lihtne ergutussüsteem ühe ergutajaga, milleks on reeglina haruvoolugeneraator (joon. 40-1). Viimane ühendatakse tavaliselt sünkroonmasina võlliga siduri või erijuhtudel ka rihmülekande abil.



Joon. 40-1. Sünkroonmasina ergutussüsteemid alalisvoolu-ergutusmasinaga:

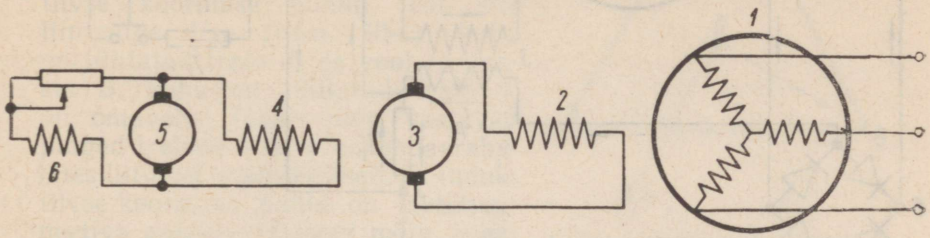
1 — sünkroonmasina ankur, *2* — sünkroonmasina ergutusmähis, *3* — ergutaja ankur, *4* — ergutaja ergutusmähis, *5* — ergutaja ergutusreostaat, *6* — sünkroonmasina ergutusreostaat

Sünkroonmasina ergutusvool nimikoormusel on 1,8 . . . 2,5 korda suurem voolust tühijooksul nimipinge juures. Skeemi 40-1, *a* kohaselt toimub sünkroonmasina ergutusvoolu reguleerimine ainult ergutaja pinge muutmise teel ergutusreostaadi *5* abil. Seepärast peab ergutaja magnetahel olema kujundatud selliselt, et oleks võimalik ergutaja pinge stabiilne reguleerimine laiades piirides. Teatavasti saavutatakse seda küllastussillakeste abil (vt. p. 8-4).

Kui ergutajaks on tavalise konstruktsiooniga masin ja seega tema pinge reguleerimine laiades piirides ei ole võimalik, siis tuleb kasutusele võtta reguleerimine ka reostaadi abil sünkroonmasina enda ergutusahelas (joon. 40-1, *b*). Sünkroonmasina minimaalse ergutusvoolu saame siis mõlema reostaadi *5* ja *6* takistuste maksimaalse väärtuse korral. Ergutusvoolu suurendamiseks on vaja esmalt vähendada reostaadi *5* takistust ja edasi regulee-

rida reostaadiga *6*, ergutusvoolu vähendamisel tuleb aga esmalt suurendada reostaadi *6* takistust. Vastasel korral võib ergutusvoolu reguleerimine toimuda ebastabiilselt.

Joonisel 40-1, *b* toodud skeemi puuduseks on lisareostaadi vajadus ning viimases esinevad võrdlemisi suured võimsuskaod, sest seda läbib sünkroonmasina kogu ergutusvool. Seepärast viimasel ajal skeemi 40-1, *b* ei kasutata.

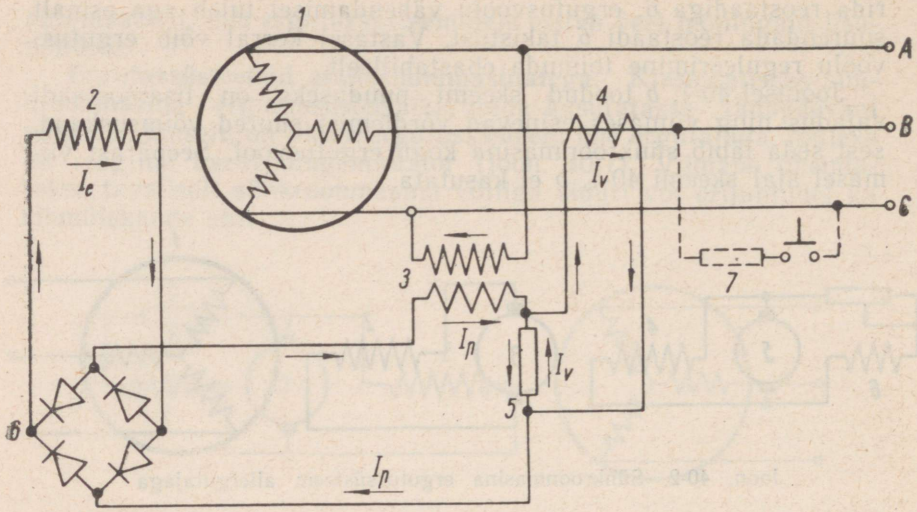


Joon. 40-2. Sünkroonmasina ergutussüsteem allergutajaga

Üksikutel juhtudel, väga võimsate generaatorite korral, kasutatakse ka joonisel 40-2 toodud ergutussüsteemi, kus lisaks ergutajale (*3*, *4*) kasutatakse ka allergutajat (*5*, *6*), mille ülesandeks on ergutaja varustamine ergutusvooluga. Antud juhtumil on ergutajaks normaalse konstruktsiooniga haruvoolugeneraator, allergutajaks aga küllastussillakestega masin. Vaadeldava süsteemi eeliseks on see, et otseselt reguleeritav vool on nõrgem kui skeemi 40-1, *a* puhul.

Võimsate sünkroonmasinate puhul kasutatakse tavaliselt ka ergutussüsteemis väljakustutusseadmeid (p. 35-4). Neid skeemidel (joon. 40-1 ja 40-2) näidatud ei ole.

Endaergutusega ja kompaundeeritud sünkroonmasinad. Võimsa sünkroonmasina puhul on ergutaja enda ja ka ergutusvoolu automaatse reguleerimisseadme maksumus võrreldes generaatori enda maksumusega väike. Võimsuse vähenemisel väheneb ka maksumuste vahe ning võimsustel alla 100 kW moodustab ergutaja maksumus juba suure osa sünkroonmasina maksumusest. Kui osutub vajalikuks kasutusele võtta ka automaatsed ergutuse reguleerimisseadmed, siis viimaste maksumus koos ergutajaga osutub paljudel juhtudel sünkroonmasina enda maksumusest isegi suuremaks. Seepärast on viimasel ajal hakatud valmistama sünkroonmasinaid ka võimsusega kuni umbes 100 kW, millel ergutaja hoopis puudub ning ergutusvool saadakse siin sünkroonmasina ankrust vastava alaldaja kaudu. Sel puhul võib rääkida endaergutusega sünkroongeneraatorist. Kuna siin niikuinii kasutatakse alaldajaid, siis ei ole raske teostada ka *sünkroonmasina kompaundeerimist*, s. o. teha ergutusvool sõltuvaks koormusvoolust, nagu see esineb segaergutusega alalisvoolugeneraatoril. Kompaundeeritud sünkroon-



Joon. 40-3. Endaergutusega ja kompaundeeritud sünkroongeneraatori skeem

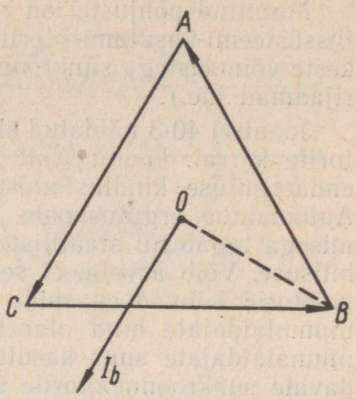
generaatori pinge jääb koormuse muutudes praktiliselt konstantseks ning seega langeb ergutusvoolu reguleerimise vajadus ära, mis tunduvalt hõlbustab teenindamist ja võimaldab saavutada kokkuhoidu.

Üks võimalikest endaergutusega ja kompaundeeritud sünkroongeneraatori skeemidest on toodud joonisel 40-3. Ankru *1* klemmidele on ühendatud trafo *3* primaarmähis. Viimase sekundaarmähisega on ühendatud järjestikku takisti *5*. Voolutrafo *4* sekundaarvool, läbides takistit *5*, tekitab viimases pinge, mis liitub trafo *3* sekundaarpingega. Summaarne pinge alaldatakse alaldajaga *6*, mis toidab ergutusmähist *2* alalisvooluga.

Joonisel 40-3 näidatud lülituses on võimalik kasutada pooljuht- (seleen-, germaanium- jt.) alaldajaid. Endaergutumine toimub sünkroonmasina pooluste jääkmagnetvoo arvel. Esialgu tekib trafo *3* sekundaarpoolel madal pinge, mis tekitab ergutusmähises *2* nõrga voolu ning pooluste voog suureneb. Seleenalaldajad omavad madalate pingete puhul avasuunas võrdlemisi suurt takistust ja seepärast toimub endaergutamine teatud raskustega. Selle hõlbustamiseks asetatakse pooluste ja rootori ikke vahele suuremat koertsitiivjõudu omavad terasplaadikesed või ühendatakse masina klemmidele lüliti kaudu sobiv takistus *7* (joon. 40-3). Lüliti lühiajalisel sulgemisel tekib ankruahelas vool ja rakendub töösse trafo *4*, mis annab vajaliku voolu ergutusmähisesse.

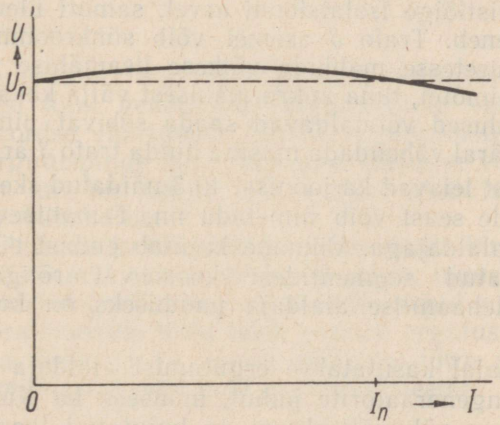
Trafo *4* koos takistiga *5* (joon. 40-3) moodustavad ergutussüsteemi kompaundeeriva osa. Koormusvoolu suurenemisel trafo *4* sekundaarvool I_v suureneb, mille tulemusena tõuseb pinge takistil

5, pinge alaldajal *6* ning suureneb ergutusvool mähises *2*. Seega jääb generaatori pinge koormuse muutudes praktiliselt konstantseks. Joonisel 40-3 toodud skeemi puhul on kompaundeerimisefekt tugevaim induktiivse koormuse puhul, sest siis liinipinge U_{AC} (joon. 40-4), kuhu on lülitatud trafo *3*, ja vool I_B faasis *B*, kuhu on lülitatud trafo *4*, on omavahel faasis ning vastavad pinged trafode *3* ja *4* sekundaarahelates liituvad aritmeetiliselt. Et induktiivse koormuse puhul on lahtimagneetiva ankrureaktsiooni mõju tugevaim, siis on joonisel 40-3 näidatud trafode lülitus kõige otstarbekam.



Joon. 40-4. Vektordiagramm joonisel 40-3 kujutatud skeemi kompaundeerimise efekti selgitamiseks

Kompaundeeritud sünkroongeneraatori pinge *U* sõltuvus koormusvoolust *I* on näidatud joonisel 40-5. Nimivoolude piirkonnas on pingemuutus ainult 2...4%. Generaator võimaldab vahetu sisselülitamise teel käivitada lühisrootoriga asünkroonmootorit, mille võimsus on lähedane generaatori võimsusele. Kompaundeerimis-



Joon. 40-5. Endaergutusega ja kompaundeeritud sünkroongeneraatori pinge sõltuvus koormusvoolust

seadme puudumisel on selline käivitamine võimatu, sest suur induktiivse iseloomuga käivitusvool põhjustab tugeva lahtimagneetiva ankrureaktsiooni ja generaatori pinge langeb peaaegu nullini.

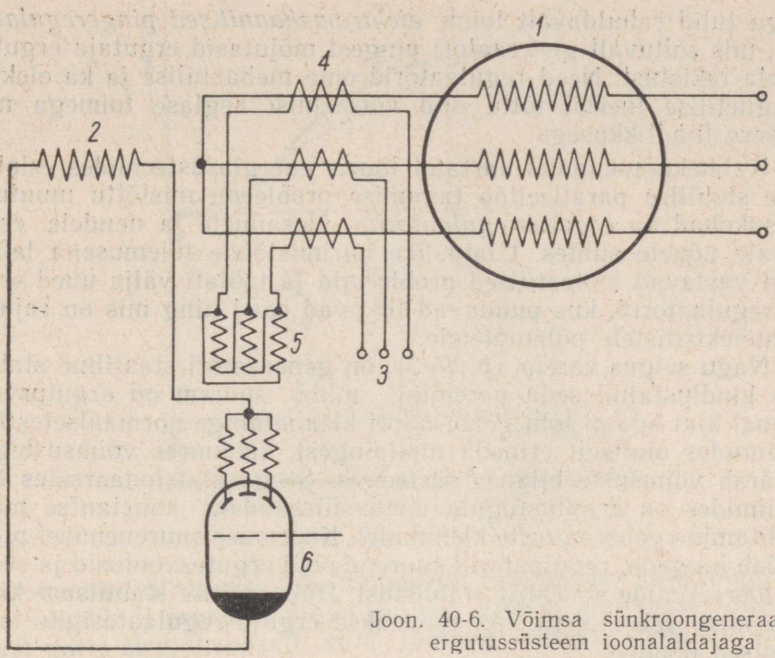
Mainitud põhjustel on endaergutusega kompaundeeritud ergutussüsteemi kasutamine eriti soovitav omaette võrku töötavate väikeste võimsustega sünkroongeneraatorite korral (kolhooside elektrijaamad jne.).

Joonisel 40-3 näidatud skeemi võib rakendada ka sünkroonmootorite korral. Loomulikult pole siis vajadust lisaabinõude järele endaergutuse kindlustamiseks, sest mootor saab pinge võrgust. Automaatne ergutusvoolu suurenemine koos koormuse suurenemisega tagab nii staatiliste kui ka dünaamiliste töörežiimide stabiilsuse. Võib arvata, et sellised väiksema võimsusega sünkroonmootorid leiavad edaspidi laialdasemat kasutamist, kui germaaniumalaldajate hind alaneb ning töökindlus suureneb. Germaaniumalaldajate suur kasutegur (kuni 95...98%) tagab vaadeldavale sünkroonmootorile sama suure kasuteguri nagu lühisrootoriga asünkroonmootoril. Samal ajal omab sünkroonmootor võimsusteguri seisukohalt eeliseid.

Skeemi joonisel 40-3 on võimalik kujundada ka teisiti. Trafo *3* võib ära jätta ning vabanevad juhtmed ühendada otse masina klemmidele. Niisuguse lahenduse puuduseks on asjaolu, et ergutusmähis peab olema kujundatud siis kõrgemale pingele kui tavaliselt. Suurema keerdude arvuga ja juhtme väiksema ristlõikega ergutusmähise jahutamistingimused halvenevad, töökindlus väheneb ning teatud määral suurenevad kaod, sest pooluse keerdude summaarne ristlõige isolatsiooni arvel, samuti üleminekul ümartraadile väheneb. Trafo *3* asemel võib sünkroonmasina ankrule samadesse uuretesse mähkida väikese lisamähise või, kasutades autotrafo põhimõtet, tuua ankru mähisest välja kaks lisajuhet. Viimased lahendused võimaldavad saada sobivat pinget ja ühtlasi mõningal määral vähendada masina hinda trafo *3* ärajätmise arvel.

Kasutamist leiavad ka joonisel 40-3 näidatud skeemi modifikatsioonid. Nende seast võib nimetada nn. Tamantsevi generaatorit mehaanilise alaldajaga. Viimane kujutab endast sünkroonmasina võllile kinnitatud segmentidest koosnevat rõngast ja harjade komplekti. Mehaanilise alaldaja puuduseks on kommutatsiooniraskused.

Viimasel ajal kasutatakse ergutamist alaldaja abil ka võimsate sünkroongeneraatorite puhul, muuseas ka Kuibõševi hüdrojaamas. Vastav põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 40-6, kus *1* on generaatori staator ja *2* tema ergutusmähis. Pinge ergutusahela klemmidele *3* antakse kas jaama kogumislattidelt, generaatori enda klemmidelt (otse või pinget madaldava trafo kaudu) või siis abi-vahelduvvoolugeneraatorilt, mis asub peageneraatoriga samal võllil. Kompaundeeriv trafo *4* on paigutatud generaatori nullpunkti poole, mis võimaldab vähendada selle trafo isolatsioonile langevat pinget. Trafo *5* toidab võretüürimisega ioonalaldajat *6*, mis koosneb ühefaasilistest elavhõbeventiilidest (ignit-



Joon. 40-6. Võimsa sünkroongeneraatori ergutussüsteem ioonalaldajaga

ronidest). Generaatori ergutuspinge on reguleeritav teatud minimaalväärtusest kuni generaatori nimirežiimile vastava ergutuspinge mitmekordse väärtuseni. Sellise ergutussüsteemi põhiliseks eeliseks on ergutuspinge mitmekordseks tõstmise võimalus lühiste puhul võrgus, mis on üheks tõhusamaks stabiilse paralleeltöö kindlustamise vahendiks.

Mõnikord leiavad kasutamist ka mitmed siin kirjeldamata jäänud ergutussüsteemid alalisvoolumasinatega, muuseas ka elektrimasin-võimendajatega. Turbogeneraatorite puhul suure pöörlemiskiiruse ja vibratsioonide tõttu tekib raskusi ergutusmasinate kommutatsiooniga. Selle ja ka muude põhjuste tõttu püütakse tänapäeval luua mitmesuguseid uusi ergutussüsteeme.

40-2. SÜNKROONMASINATE ERGUTUSE REGULEERIMINE

Tänapäeva energiasüsteemides on üheks tähtsaimaks probleemiks sünkroongeneraatorite ergutusvoolu automaatne reguleerimine.

Automaatset ergutusvoolu reguleerimist on kasutatud juba kauemat aega. Varem oli seejuures põhiliseks ülesandeks konstantse pinge säilitamine generaatorite klemmidel. Selle ülesan-

dega tulid rahuldavalt toime *elektromehaanilised pingeregulaatorid*, mis sõltuvalt generaatori pingest mõjutasid ergutaja ergutusahela takistust. Need regulaatorid oma mehaanilise ja ka elektromagnetilise inertsi tõttu olid võrdlemisi aeglase toimega ning vähese tundlikkusega.

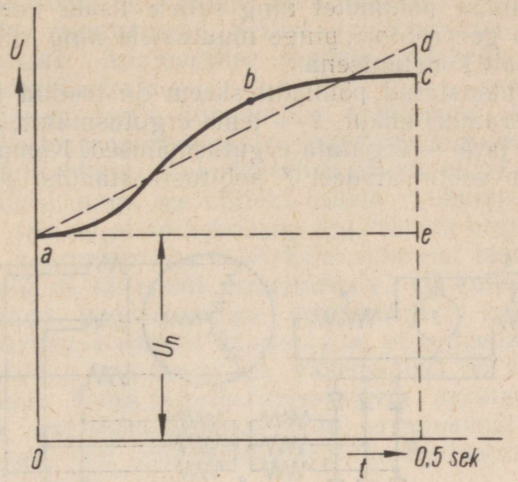
Kolmekümnendatel aastatel tõusis energiasüsteemides esiplaanile stabiilse paralleeltöö tagamise probleem, mistõttu muutusid seisukohad ka *ergutusregulaatorite* ülesannete ja nendele esitatavate nõuete suhtes. Ulatuslike uurimistööde tulemusena lahendati vastavad teoreetilised probleemid ja töötati välja uued ergutusregulaatorid, kus puuduvad liikuvad osad ning mis on rajatud puhtelektrilistele põhimõtetele.

Nagu selgus varem (p. 36-3), on generaatori staatiline stabiilsus kindlustatud seda paremini, mida suurem on ergutusvool. Samal ajal aga ei tohi generaatori klemmipinge normaalsetes töörežiimides oluliselt erineda nimipingest, kusjuures võimsusteguri määrab võimsuste bilanss süsteemis. Seega statsionaarsetes töörežiimides on ergutusregulaatorite ülesandeks konstantse pinge säilitamine generaatorite klemmidel. Koormuse suurenemisel pinge püüab langeda, regulaatorid suurendavad ergutusvoolusid ja seega ka tööreżiimide staatilist stabiilsust. Dünaamilise stabiilsuse kindlustamise seisukohalt aga esitatakse ergutusregulaatoritele teistsugused nõuded.

Ergutuse forsseerimine. Kõige raskem olukord dünaamilise stabiilsuse seisukohalt tekib energiasüsteemides lühiste puhul, kus pinge vähenemise tõttu generaatorite poolt arendatav elektriline võimsus väheneb ja nad püüavad sünkronismist välja langeda (vt. p. 39-2). Olukorra parandamiseks tuleb püüda pinget kogu süsteemis, samuti generaatorite klemmidel säilitada võimalikult kõrgel tasemel. Selleks tuleb pärast lühise tekkimist püüda võimalikult kiiresti, sekundi murdosa vältel, tõsta generaatorite ergutusvoolud maksimaalsete lubatavate väärtusteni, kuigi seejuures lühisvoolud suurenevad. Kuna lühise kestus on lühike, siis soojenemise seisukohalt ei ole tugevad voolud ohtlikud.

Generaatori ergutusmähise suur induktiivsus aeglustab ergutusvoolu tõusu. Selle kiirendamiseks rakendatakse lühise puhul võrgus ergutusmähisele maksimaalne võimalik ja lubatud pinge, mida nimetatakse *ergutuse lagipingeks*. Hüdrogeneraatorite ergutajate lagipinge peab ГОСТ 5616-50 kohaselt olema vähemalt 1,8-kordne, turbogeneraatorite ja sünkroonkompensaatorite ergutajatel ГОСТ 533-51 ja ГОСТ 609-54 kohaselt aga vähemalt kahekordne nimiergutuspinge.

Oluline on ka ergutuse forsseerimisel esinev *ergutuspinge suurenemise kiirus*. Masinergutajate puhul toimub ergutuse forsseerimine ergutaja ergutusahelas oleva reostaadi või takisti šunteerimise teel, mida teostab generaatori pinge alanemisele reageeriv relee. ГОСТ 183-55 kohaselt on määratud ergutuspinge vajalik



Joon. 40-7. Ergutuspinge suurenemise kiiruse määramine ergutuse forsseerimisel

suurenemise kiirus ergutaja töötamisel tühijooksul nimipinge juures. Tegelikult ergutaja pinge sellises olukorras ei tõuse sõltuvalt ajast mitte sirgjooneliselt, vaid teatava kõvera kohaselt (joon. 40-7, kõver *abc*). See kõver sirgestatakse nii (joon. 40-7), et pindalad *ade* ja *abce* oleksid võrdsed, kusjuures $t = 0{,}5$ sek. Pinge suurenemise kiirus määratakse siis suhtega

$$\frac{2de}{Oa}\ \frac{\text{V}}{\text{sec}}.$$

NSV Liidu normide kohaselt peab ergutuspinge suurenemise kiirus olema turbogeneraatorite, hüdrogeneraatorite ja sünkroonkompensaatorite ergutajatel mitte väiksem kui vastavalt 1,6-, 1,4- ja 2,0-kordne nimiergutuspinge ühe sekundi kohta.

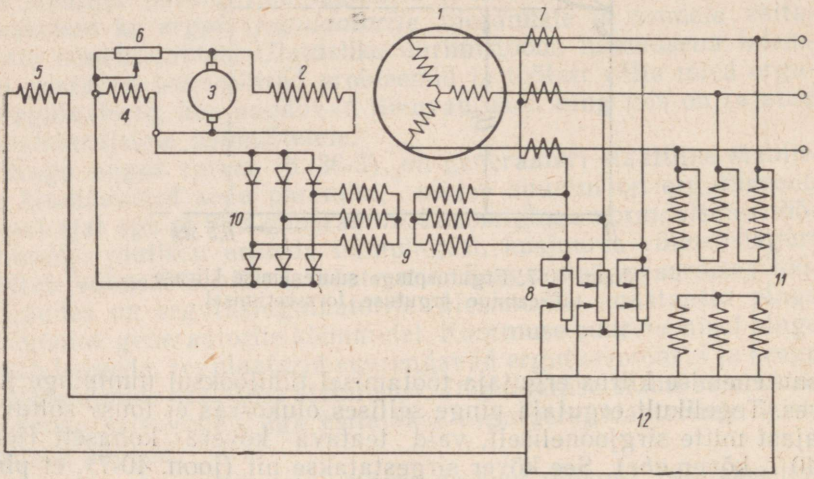
Joonisel 40-6 toodud ergutussüsteemi puhul toimub ergutuse forsseerimine ergutuspinge tõstmise teel maksimaalse väärtuseni alaldaja võrede mõjutamisega. Seejuures saavutatakse väga suured ergutuspinge suurenemise kiirused, kuni 5...7 ja enamgi nimiergutuspinget ühe sekundi kohta, mis on võimalik tänu vaadeldava ergutussüsteemi väga väikesele inertsile.

Ergutuse forsseerimist lühiste puhul võrgus rakendatakse ka võimsate sünkroonmootorite korral, mis samuti tagab võrgupinge säilitamise kõrgemal tasemel ja mootorite stabiilse töö.

Ergutuse reguleerimisseade kompaundeerimisega ja elektromagnetilise pingekorrektoriga. Masinergutajates kasutatakse laialdaselt V. L. Inossovi ja L. V. Tsukerniki poolt väljatöötatud ergutusvoolu reguleerimise seadet, mis ei oma liikuvaid osasid, on kiire toimega ja suure tundlikkusega. Seadmes on rakendatud

kompaundeerimise põhimõtet ning sellele lisaks veel korrektorit, mis reageerib generaatori pinge muutustele ning võimaldab seda hoida täpsemalt konstantsena.

Seadme lihtsustatud põhimõtteskeem on toodud joonisel 40-8, kus *1* on generaatori ankur, *2* — tema ergutusmähis, *3* — ergutaja ankur ning *4* ja *5* — ergutaja ergutusmähised. Kompaundeerimisseade koosneb voolutrafodest *7*, sobitusreostaadist *8*, trafost *9* ja



Joon. 40-8. Sünkroongeneraatori ergutuse reguleerimise seade kompaundeerimisega ja elektromagnetilise pingekorrektoriga

pooljuhtalaldajast *10*. Pinge reostaadil *8* on võrdeline generaatori koormusvooluga ja on trafo *9* primaarpingeks. Alaldatud kompaundeerimisvool läbib endaergutusmähist *4* ning moodustab viimases ergutusvoolu lisakomponendi. See komponent tekib generaatori koormuse suurenemisel siis, kui trafo *9* sekundaarpinge alaldatuna osutub võrdseks ergutusmähisel *4* esineva pingega. Seega väiksemate (kuni 20 ... 30%) koormuste korral kulgeb mähises *4* ainult endaergutusvool.

Pingekorrektor *12* saab toite pingetrafolt *11*. Tema enda töötamispõhimõtte lähem selgitus ei ole siinkohal võimalik. Olgu ainult märgitud, et ta koosneb magnetvõimendajast, küllastatud trafost, paispoolist ja alaldajatest. Korrektor toidab alaldatud vooluga ergutaja lisaergutusmähist *5* ning selle kaudu mõjutab generaatori ergutust.

Ergutuse forsseerimine toimub reostaadi *6* šunteerimise teel vastava relee toimel, mida joonisel 40-8 ei ole näidatud.

Tugevatoimelised ergutusregulaatorid. Pinge reguleerimise süsteem kompaundeerimisseadmega ja pingekorrektoriga reageerib

ainult pinge ja voolu muutustele, muutes ergutusvoolu võrdeliselt nende suuruste muutustega. Sellist *reguleerimist* nimetatakse *proportsionaalseks*. Analoogilise seaduspärasusega töötavad ka paljud teised regulaatorid.

Sünkroongeneraatorite dünaamilise stabiilsuse kindlustamise seisukohalt ei ole proportsionaalne ergutuse reguleerimine tänapäeval alati küllaldane. Kui rikutakse mehaanilise ja elektrilise võimsuse bilanssi, nagu see näiteks esineb võnkumiste puhul (vt. ptk. XXXIX), siis on otstarbekohane reguleerida ergutusvoolu nii, et vähendada koormusnurga Θ kõrvalekaldumist tasakaaluolukorrast ja võimalikult kiiremini summutada võnkumised. Selleks tuleb generaatori koormusnurga suurenemisel ergutusvoolu ja seega ka elektrilist võimsust suurendada, et tugevdada koormuse pidurdavat efekti; koormusnurga vähenemisel on vaja ergutusvoolu vähendada. Kuna reguleerimissüsteem paratamatult omab teatud inertsi, sest induktiivsuste mõjul ergutusvool muutub teatud hilinemisega, siis on soovitav ergutusregulaatori toime teha sõltuvaks nurga Θ muutumise kiirusest, s. o. tema tuletisest $\frac{d\Theta}{dt}$. Mida kiiremini muutub nurk Θ, s. o. mida suurem on tema tuletis, seda tugevamat toimet peab avaldama regulaator ja vastupidi. Kui nurk Θ kasvab ja tuletis on positiivne, siis regulaator peab ergutusvoolu suurendama. Nurga vähenemisel, kui tuletis on negatiivne, peab regulaator ergutusvoolu vähendama. Teostades reguleerimist nurga Θ tuletise järgi, regulaator nagu näeks ette nurga Θ muutuse suurust ja sobitab enda toimet sellele. On Θ tuletis suurem, siis muutub nurk Θ kiiresti ja tema kõrvalekaldumine tasakaalurežiimist osutub samuti suuremaks. Regulaatori toime on siis ka tugevam, mis soodustab tasakaalurežiimist kõrvalekaldumise vähendamist.

Lähem analüüs näitab, et otstarbekohane on teha regulaatori toime sõltuvaks ka rootori kiirendusest ehk nurga Θ teisest tuletisest aja järgi. Kui see teine tuletis on null:

$$\frac{d^2\Theta}{dt^2} = 0,$$

siis tähendab see, et esineb võimsuste tasakaal ja seepärast ergutusvoolu muutmise vajadust ei ole. Kui aga rootori kiirendus ja seega ka nurga Θ teine tuletis on suured, peab regulaatori toime olema tugev.

Regulaatoreid, mille toime sõltub mitte üksnes teatud suuruse enda muutusest, vaid ka selle muutumise kiirusest ja kiirendusest, nimetataksegi *tugevatoimelisteks regulaatoriteks*. Küsimuse rangem analüüs reguleerimisteooria kohaselt näitab, millises vahekorras peab igal konkreetsel juhul olema üksikute tähendatud suuruste mõju. Tugevatoimelised regulaatorid on esmakordselt maailmas kasutusele võetud Kuibõševi hüdroelektrijaama gene-

raatorite ergutusvoolu reguleerimiseks. Sellised regulaatorid osutusid väga efektiivseteks generaatorite võnkumiste summutamise ja seega ka nende dünaamilise stabiilsuse kindlustamise vahenditeks. Kuna generaatorite koormusnurga ja selle tuletiste määramine, mis peab toimuma automaatselt ja pidevalt, on seotud raskustega, siis mainitud regulaatorid tegelikult teevad kindlaks generaatorite ankruvoolude muutuste kiirusi ja kiirendusi ning avaldavad nende suurustega võrdelist toimet. Nagu selgub jooniselt 39-3, on nurga Θ ja ankruvoolu I muutuste seaduspärasused võnkumiste puhul analoogilised ja seepärast ongi ühe suuruse asendamine teisega võimalik. Kuibõševi hüdrogeneraatorite ergutusregulaatorite kolmas mõõteelement reguleerib ergutusvoolu generaatori pinge järgi, püüdes hoida viimast konstantsena. Regulaator mõjutab ergutusvoolu alaldajate (joon. 41-6, pos. *6*) võrepingete kaudu.

XLI PEATÜKK

ERITÜÜPI SÜNKROONMASINAD

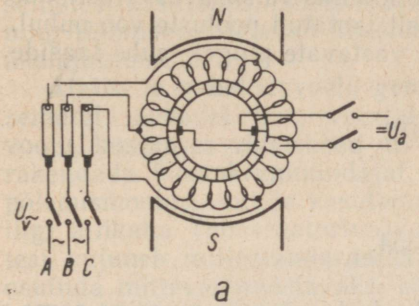
41-1. SÜNKROONMASINAD — MUUNDAJAD

Üheankrumuundaja. Teatavasti esineb alalisvoolumasina ankru mähises vahelduvvool (vt. p. 1-1). Kui ühendada tema ankru mähis ka kontaktrõngastega (joon. 41-1, *a*, *b*), siis saame viimastel vahelduvvoolu, kusjuures sellist masinat nimetatakse üheankrumuundajaks. Viimase ergutamine (joon. 41-1, *b*, vool I_e) toimub analoogiliselt haruvoolumasinaga.

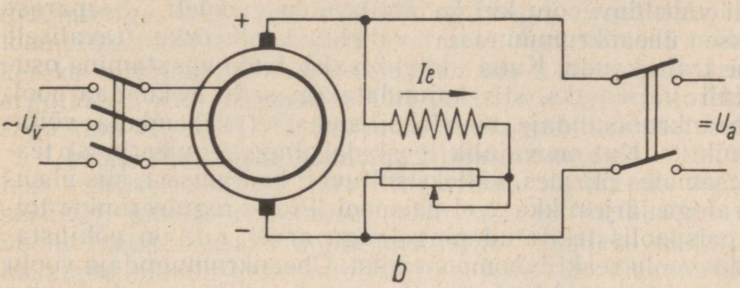
Üheankrumuundajat kasutatakse tavaliselt vahelduvvoolu muundamiseks alalisvooluks. Selleks ühendatakse masin kontaktrõngaste poolt vahelduvvooluvõrku (pingega U_v) ja selle suhtes töötab ta kui sünkroonmootor. Samal ajal saadakse kommutaatori harjadel alalispinge U_a ja masin võib anda alalisvoolu vastavatele tarbijatele. Alalisvooluvõrgu suhtes töötab masin siis alalisvoolugeneraatorina. Vahelduvvoolu võimsus on alalisvoolu võimsusest kadude võrra suurem. Arendatav mehaaniline moment on parajasti selline, nagu on vajalik rauas- ja hõõrdekadude katmiseks.

Samuti võib vaadeldavat masinat kasutada ka alalisvoolu muundamisel vahelduvvooluks. Siis töötab ta alalisvooluvõrgu suhtes alalisvoolumootorina ning vahelduvvooluvõrgu suhtes sünkroongeneraatorina.

Üheankrumuundaja pöörlemisel pooluste magnetväljas indutseeritakse ankru mähises emj. Generaatorirežiimis on teatavasti ankru vool (vahelduvvoolu puhul viimase aktiivkomponent) ankru elektromotoorse jõuga samasuunaline; mootorirežiimis aga vastassuunaline. Kuna üheankrumuundaja töötab samal ajal nii



Joon. 41-1. Üheankrumuundaja konstruktsiooni põhimõte (*a*) ja skeem (*b*)



generaatorina kui ka mootorina, siis toimivad vahelduvvoolu- ja alalisvooluvõrkude koormusvoolud ankru mähises vastupidistes suundades ning resulteerivaks vooluks ankru mähises on nende vahe, mis on seega väiksem kui tavalises alalisvoolu- või sünkroonmasina ankrus sama välise koormuse juures. Sama asjaolu peegeldub ka selles, et masin arendab suhteliselt väikest mehaanilist momenti. Sisuliselt on asi nii, et vool kontaktrõngaste harjadelt kulgeb kommutaatori harjadele ja, vastupidi, suurel määral otse, läbides vaid üksikuid mähise sektsioone, mistõttu sektsioonide voolu keskmine väärtus väheneb. Ankru pöörlemise tõttu olukord sektsioonides pidevalt muutub ning iga üksiku sektsiooni voolukõver on keerulise kujuga. Vaadeldud protsessi tulemusena võivad kaod üheankrumuundaja ankru mähises olla väiksemad, kasutegur aga suurem kui tavalises alalisvoolu- või sünkroonmasinas. Tegelikult mõjutab kadusid vahelduvvoolu poolt ka võimsustegur ja faaside arv. Kui võimsustegur väheneb ja seega ankru voolu reaktiivkomponent suureneb, siis kaod ankrus suurenevad. Kui suurendada faaside arvu, võttes $m = 3$ (joon. 41-1) asemel $m = 6$, kasutades selleks kaks korda rohkem väljavõtteid mähisest, samuti kaks korda rohkem kontaktrõngaid, siis keskmised teekonnad mähises kontaktrõngaste ja kommutaatori harjade vahel suhteliselt vähenevad ning koos sellega vähenevad ka kaod.

Et alalis- ja vahelduvpinged (U_v, U_a) saadakse samast mähi-

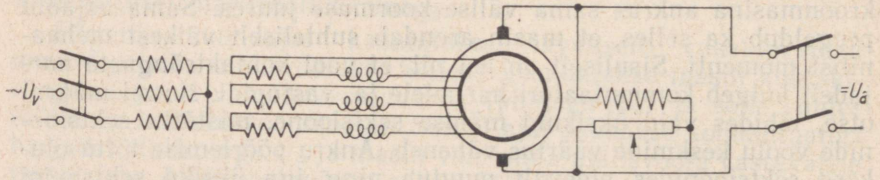
sest, siis on nende pingete suurused kindlas vahekorras. Küsimuse lähem analüüs näitab, et siinuseliselt jaotatud pooluste voo puhul, kui mitte arvestada pingelange, on vastavate pingete suhe faaside arvu $m = 3$ korral:

$$\frac{U_v}{U_a} = 0{,}612$$

ja $m = 6$ korral:

$$\frac{U_v}{U_a} = 0{,}354.$$

Järelikult ei ole võimalik standardsete pingete saamine samaaegselt nii vahelduvvoolu kui ka alalisvoolu poolelt. Seepärast ühendatakse üheankrumuundaja vahelduvvooluvõrku tavaliselt spetsiaalse trafo kaudu. Kuna individuaalse trafo kasutamine osutub niikuinii vajalikuks, siis kujundatakse selle sekundaarpool, samuti üheankrumuundaja kuuefaasilistena, et vähendada võimsuskadu ankrus. Kui on vajalik teostada pinge reguleerimist teatavates kitsamates piirides, näiteks sõltuvalt koormusest, siis ühendatakse trafoga järjestikku veel paispool. Pinge reguleerimine toimub siis paispoolis tekitatud pingelangu arvel, mis on põhjustatud vahelduvvoolu reaktiivkomponendist. Üheankrumuundaja voolu reaktiivkomponenti saab aga muuta ergutusvoolu reguleerimise teel reostaadi abil ergutusahelas. Tulemusena võib masinat koormata nii mahtuvusliku kui ka induktiivse vooluga ja vastavalt alalispinget suurendada või vähendada. Kirjeldatud seadme skeem on toodud joon. 41-2.



Joon. 41-2. Kuuefaasiline üheankrumuundaja trafoga ja paispooliga

Kui on olemas alalisvoolu allikas, näiteks akupatarei näol, siis võib üheankrumuundajat käivitada ka alalisvoolumootorina ning edasiselt sünkroniseerida vahelduvvooluvõrguga. Kui selline võimalus puudub, käivitatakse üheankrumuundaja vahelduvvoolu poolelt nagu sünkroonmootor asünkroonselt. Sel eesmärgil paigutatakse üheankrumuundaja pooluskingadesse käivitusmähis.

Varem kasutati üheankrumuundajaid laialdaselt trammide ja elektrifitseeritud raudteede kontaktvõrkude toitmiseks alalisvooluga, samuti ka teisteks otstarveteks. Seejuures nende võimsused ulatusid 1000 ... 3000 kW. Viimasel ajal on üheankrumuundajad

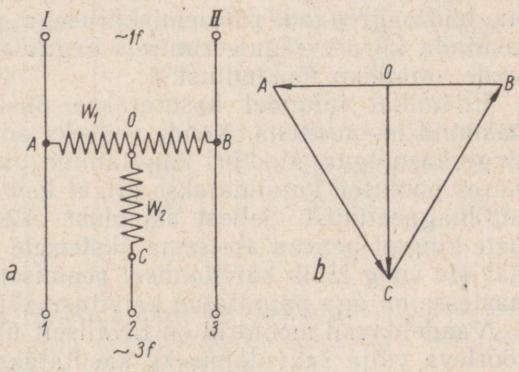
sellistest kasutamisaladest elavhõbealaldajate poolt välja tõrjutud ning tänapäeval leiavad üheankrumuundajad rakendamist ainult üksikjuhtumitel.

Alalis- ja vahelduvvoolu generaator. Erijuhtudel, näiteks väiksematel laevadel jne., vajatakse nii vahelduv- kui ka alalisvoolu, kusjuures võimsused on suhteliselt väikesed. Ka siis võib rakendada üheankrumuundajat, kui panna ta tööle näiteks sisepõlemismootori abil ja kasutada teda samaaegselt mõlema vooluliigi allikana (generaatorina). Et seejuures vähemalt üks pingetest kujuneb mittestandardseks ja pealegi selle suurusjärk võib osutuda mittevastuvõetavaks, siis tavaliselt varustatakse ankur kahe erisuguse omaette mähisega, milledest üks ühendatakse kommutaatoriga, teine aga kontaktrõngastega. Ergutusvool saadakse loomulikult ankru alalisvoolumähisest. Kui viimase mähise ainukeseks tarbijaks on ergutusmähis, siis saame omapärase endaergutusega sünkroongeneraatori. Sääraseid generaatoreid võimsusega kuni 12,5 kVA ehitatakse ka Nõukogude Liidus (seeria СГС).

Ühefaasilise voolu kolmefaasiliseks muundaja. Mõnikord, näiteks vahelduvvooluga elektrifitseeritud raudteede veduritel abiseadmete mootorite toitmisel, tekib vajadus ühefaasilise vahelduvvoolu muundamiseks kolmefaasiliseks. Selleks otstarbeks võib kasutada mootor-generaatorit, mis koosneb ühefaasilisest sünkroon- või asünkroonmootorist ja kolmefaasilisest sünkroongeneraatorist. Otstarbekam on aga kasutada ühest ainsast masinast koosnevat muundajat. Selliseks muundajaks osutub põhiliselt ühefaasiline sünkroonmootor, mille ankrule on paigutatud lisamähis.

Muundaja ankru mähiste põhimõtteskeem on toodud joonisel 41-3, *a*. Põhimähis *AB* ühendatakse ühefaasilisesse võrku (klemmid *I*, *II*). Abimähis *OC* on aga peamähisest *AB* nihutatud ruumiliselt 90 elektrilise kraadi võrra ning tema algus *O* on ühendatud mähise *AB* keskpunktiga. Abimähise keerdude arv w_2 on mõnevõrra väiksem põhimähise keerdude arvust w_1 ($w_2 \approx 0{,}9\ w_1$).

Ühefaasilise sünkroonmootori töötamisel esineb tegelikult



Joon. 41-3. Ühefaasilise voolu kolmefaasiliseks muundaja ankru mähise skeem (*a*) ja pingete vektordiagramm (*b*)

ainult pärisuunaline ankrureaktsiooni magnetväli, sest vastassuunaline väli summutatakse enam-vähem täielikult summutus- või käivitusmähise poolt. Resulteeriv väli pöörleb seega ka praktiliselt vaid pärisuunas ja indutseerib mähises OC pinge U_{OC}, mis on nihutatud mähise AB pingest U_{AB} 90° võrra (joon. 41-3, *b*). Vastavalt osutub ankru mähise klemmide ABC vaheline pingete süsteem normaalseks kolmefaasiliseks pingesüsteemiks klemmidel *1*, *2*, *3* (joon. 41-3, *a*).

Mootor ise töötab tühijooksul, sest võllil koormust ei ole. Lähem analüüs näitab, et pool kolmefaasilise süsteemi võimsusest saadakse otseselt ühefaasilisest võrgust, teine pool aga muundatakse masinas elektromagnetilisel teel.

Kui toide saadakse ühefaasilisest trafost, siis võib abimähise lõpp *O* olla ühendatud ka trafo sekundaarmähise keskpunktiga, mitte aga muundaja peamähise keskpunktiga.

41-2. ERITÜÜPI SÜNKROONMOOTORID

Püsivmagnetitega sünkroonmasinad. Sageli leiavad kasutamist, peamiselt mootorina, mitmed väikese võimsusega sünkroonmasina eritüübid. Üheks neist on püsivmagnetitega sünkroonmasin.

Viimasel ajal on püsivmagnetite valmistamise menetlus tõhusalt arenenud erisulamite väljatöötamise tulemusena. Seoses sellega hakatakse üha laialdasemalt kasutama sünkroonmasinaid, mille poolused valmistatakse püsivmagnetitena ning seepärast neil puudub ergutusmähis. Tulemusena kujuneb masina konstruktsioon ja teenindamine lihtsaks. Tänapäeval ehitatakse selliseid masinaid võimsustele kuni mõni kilovatt.

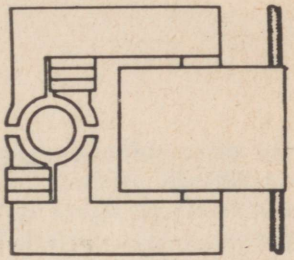
Püsivmagnetitega masinaid kasutatakse mõnikord ka generaatoritena, näiteks hüdrogeneraatorite puhul hüdroturbiini kiirusregulaatori mootori toitmiseks. Mainitud juhul asub see masin hüdrogeneraatoriga samal võllil, kusjuures ta sagedus on võrdeline hüdroagregaadi pöörlemiskiirusega, mis võimaldabki masinat kasutada kiiruse reguleerimisel. Ergutuse puudumise tõttu omab seade vajalikku töökindlust.

Enamikul juhtudel kasutatakse püsivmagnetitega sünkroonmasinaid mootoritena. Nende eeliseks on lihtne konstruktsioon ja kõrge kasutegur. Mootori käivitamine toimub asünkroonselt, kusjuures poolused kujundatakse nii, et käivitamisel ei esineks nende lahtimagneetimist. Sellest asjaolust tuleneb nõue, et naaberpooluste kingad peavad asetsema üksteisele üsna lähestikku, sest siis mähiste voog läbib käivitamisel peamiselt ainult pooluskingi. Viimastesse on aga paigutatud käivitusmähise vardad.

Vaadeldavad mootorid on tavaliselt ühefaasilised. Käivitamisel pöörleva välja saavutamiseks kasutatakse ankru mähise suhtes

samu võtteid nagu ühefaasiliste asünkroonmootorite puhulgi (abimähis lisatakistusega või -kondensaatoriga).

Hüstereesimootorid. Viimasel ajal, samuti seoses magnetiliste materjalide tootmise arenguga, leiavad üha laialdasemat kasutamist nn. hüstereesimootorid. Viimaste rootor on silindriline ning valmistatud suure koertsitiivjõuga ferromagnetilisest materjalist (kroomterased, sulamid alniko jt.). Käivitusmähiseks on rootorikeha ise. Käivitamise lõpul tõmbub mootor sünkronismi ja töötab kui sünkroonmootor, sest suure koertsitiivjõu tõttu ankruvoo toimel rootor magneetub ja saab püsivmagneti omadused.



Joon. 41-4. Ühefaasiline lõhestatud poolustega ja lühiskeerdudega hüstereesimootor

Hüstereesimootoreid ehitatakse võimsustele kuni mõnisada vatti. Nad on tavaliselt ühefaasilised ning käivitamise otstarbel kasutatakse staatoril kas abimähist või võimsustel kuni 30 W kujundatakse staator lõhestatud nähtavate poolustega ja lühiskeerdudega, s. o. täiesti analoogiliselt vastavate ühefaasiliste asünkroonmootoritega (joon. 41-4). Viimase konstruktiivse kujundusega hüstereesimootoreid kasutatakse väga laialdaselt registreerivate mõõteriistade juures paberlindi vedamiseks. Kuna lindi kiirus tavaliselt peab olema väike, siis mootor ühendatakse hammasratasreduktoriga. Selliseid mootoreid nimetatakse tihti ka Warreni mootoriteks. Nende mootorite võimsus on mõne vati piirides ning pöörlemiskiirus 1 . . . 100 pööret minutis. Järgnevas tabelis on esitatud mõningad andmed selliste mootorite kohta.

Tabel 41-1

Hüstereesimootorite andmed

Mootori tüüp	Kiirus p/min	Käivitus-moment gcm	Maksimaalne moment gcm	Tarbitav võimsus W	Pinge V
СД-60	60	20	20	13	12, 127, 220
СД-2	2	700	700	13	12, 127, 220
СРД-2	2	—	500	30	24

Hüstereesimootoreid rakendatakse ka elektrigrammofonides ja automaatsetes juhtimis- ning reguleerimisseadmetes, kui konstantne pöörlemiskiirus omab olulist tähtsust.

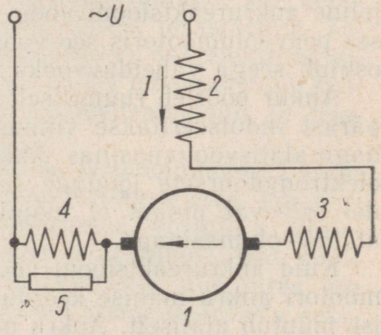
Reaktiivne sünkroonmootor. Sellise masina töötamispõhimõttega tutvusime juba varem (p. 36-3). Teda on võimalik kasutada kas kolme- või ühefaasilise sünkroonmootorina. Käivitamine võib toimuda asünkroonselt nagu eelmiste väikeste sünkroonmootorite puhulgi. Sellised mootorid leidsid varem mõningat kasutamist, kuid väikese võimsusteguri ja seepärast suhteliselt suure ankruvoolu tõttu kasutatakse viimasel ajal nende asemel enamasti püsivmagnetitega või hüstereesimootoreid.

XLII PEATÜKK

ÜHEFAASILISED KOMMUTAATORMOOTORID

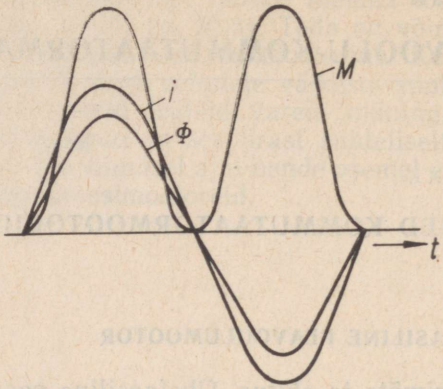
42-1. ÜHEFAASILINE PEAVOOLUMOOTOR

Töötamispõhimõte ja ehitus. Ühefaasiline peavoolumootor sarnaneb oma ehitusviisi ja töötamispõhimõtte poolest alalisvoolu-peavoolumootoriga. Viimase pöördemoment ja seega ka pöörlemissuund toitepinge polaarsuse muutmisel ei muutu, sest samaaegselt muutuvad nii ergutusvoo kui ka ankru voolu suunad. Seega alalisvoolu-peavoolumootor on põhimõtteliselt suuteline töötama ka toitepinge polaarsuse perioodilisel muutumisel, s. o. vahelduvvoolutoitega. Raskus seisab vaid selles, et perioodiliselt muutuv vahelduv ergutusvoog indutseerib massiivsetes magnetahela osades (ike, poolused) tugevaid pöörisvoolusid ning sellest tingituna esinevad suured energiakaod. Seepärast koostatakse ühefaasilise peavoolumootori ike ja poolused elektrotehnilise terase stantsitud lehtedest. Viimased tavaliselt isoleeritakse üksteisest lehtede lakkimise teel.



Joon. 42-1. Ühefaasilise peavoolumootori skeem:
1 — ankur, *2* — ergutusmähis, *3* — kompensatsioonimähis, *4* — lisapooluste mähis, *5* — takisti

Joonisel 42-1 on toodud ühefaasilise peavoolumootori skeem. Joonisel 42-2 on näidatud mootori pooluste voo Φ, voolu I ja pöördemomendi M kõverad sõltuvalt ajast. Voog Φ ja vool I muutuvad siinuseliselt ning on ajaliselt faasis. Moment M on võrdeline Φ ja I korrutisega ning seega oma märki ei muuda, kuid on



Joon. 42-2. Ühefaasilise peavoolumootori elektromagnetilised suurused sõltuvalt ajast

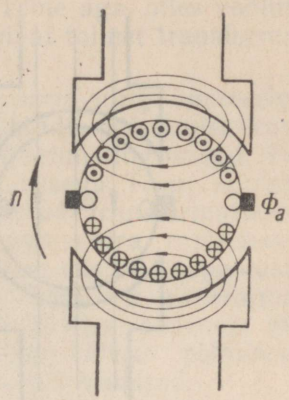
pulseeriv. Momendi pulseerimise sagedus võrdub kahekordse voolusagedusega ja on seega küllalt kõrge. Kuna mootori pöörlevate osade mehaaniline inerts on samuti üsna suur, siis on pöörlemiskiirus praktiliselt konstantne ning selle võnkumist ei ole võimalik märgata. Teiste sõnadega võib öelda, et mootor reageerib vaid momendi keskmisele väärtusele ning seepärast võib momendi pulseerimist enamikul juhtudel jätta arvesse võtmata.

Ankrureaktsioon. Ühefaasilisel peavoolumootoril paigutatakse harjad geomeetrilisesse neutraalvöösse ning seepärast niisuguse masina töötamisel tekib samuti nagu alalisvoolumasinas põikiteljeline ankrureaktsiooni voog. Vahe on ainult selles, et ühefaasilises peavoolumootoris see voog pulseerib toitevoolu sagedusega ja osutub seega vahelduvvooks.

Ankur pöörleb ruumiliselt seisvas ankrureaktsioonivoos ja seepärast indutseeritakse viimase poolt ankru mähises emj. samuti nagu alalisvoolumasinas. Ankru mähise paralleelharudes on nende elektromotoorsete jõudude summa null ning seetõttu nad harjadel esinevat pinget ei mõjuta. Ka siin esineb täielik analoogia alalisvoolumasinaga.

Kuid ankrureaktsiooni voog indutseerib ühefaasilise peavoolumootori ankru mähise keerdudes veel emj. ka selle tõttu, et voog ise muutub ajaliselt. Ankru mähist (joon. 42-3) võib vaadelda kui pooli, mille telg ühtib harjade ning ankrureaktsioonivoo teljega. Ankrureaktsioonivoo Φ_a toimel indutseeritakse poolis emj., mis moodustab teatud pinge harjadel. Joonisel 42-3 on näidatud ankru mähise juhtmetes indutseeritud emj. suunad ankrureaktsioonivoo suurenemisel. Vaadeldav emj. on sisuliselt ankru mähise endainduktsiooni emj., mida võib arvestada vastava induktiivtakistuse

näol. See takistus suurendab kogu mootoriahela reaktiivtakistust, samuti selles esinevat pingelangu ning halvendab võimsustegurit. Olukorra parandamiseks paigutatakse ühefaasilise peavoolumootori pooluskingadesse kompensatsioonimähis K (joon. 42-1), mille ülesandeks on ankrureaktsiooni toime võimalikult täiuslik kompenseerimine. Mähise konstruktsioon ja töötamine on täiesti analoogilised alalisvoolumasina kompensatsioonimähisega.

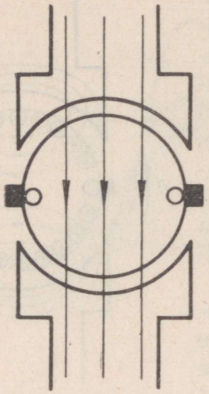


Joon. 42-3. Ühefaasilise peavoolumootori ankrureaktsiooni voog

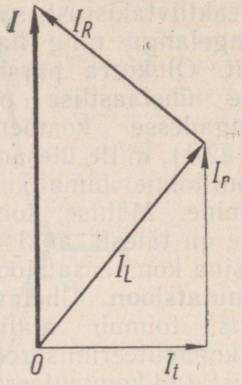
Kommutatsioon. Ühefaasilises peavoolumootoris toimub alalisvoolumasinale sarnane kommuteerimisprotsess. Harjade poolt lühistatud kommuteeritava sektsiooni vool muutub tingituna üleminekust ühest paralleelharust teise. Kuna sektsiooni kommuteerimisperiood on väike, võrreldes mootori toitevoolu perioodiga, siis sektsiooni kommuteerimise vältel mootori voolu hetkväärtus oluliselt ei muutu. Seepärast toimubki ühefaasilises peavoolumootoris kommuteerimine põhiliselt samuti nagu alalisvoolumasinas ja vahe seisab ainult selles, et üksikute sektsioonide kommuteerimine ühefaasilises peavoolumootoris toimub erinevate ankru voolu hetkväärtuste juures.

Kommuteerimisel indutseeritakse lühistatud sektsioonis jällegi samasugused kommuteerimist aeglustavad elektromotoorsed jõud (vastastikuse ja endainduktsiooni emj.) nagu alalisvoolumasinaski. Samuti võib neid elektromotoorseid jõude kompenseerida lisapooluste abil. Et aga tegemist on vahelduvvooluga, siis koostatakse lisapooluste südamikud elektrotehnilisest terasplekist. Tegelikult stantsitakse kogu magnetahela staatori osa elektrotehnilise terase lehtedest tervikuna, kusjuures selles moodustuvad suuremad ja väiksemad uurded ergutus-, kompensatsiooni- ja lisapooluste mähiste paigutamiseks.

Samal ajal indutseeritakse ühefaasilise peavoolumootori kommuteerivates sektsioonides veel nn. *transformatoorne emj.*, mis oluliselt raskendab tema kommutatsioonitingimusi, võrreldes alalisvoolumasinaga. See emj. indutseeritakse peapooluste voo poolt viimase ajalise muutumise tõttu (vahelduvvoog), kusjuures see voog kogu oma suuruses aheldub lühistatud kommuteeritava sektsiooniga (joon. 42-4). Vaadeldava emj. suurus oleneb ainult pooluste voo suurusest ja sagedusest ning ei olene ankru pöörlemiskiirusest. Seega avaldub näiteks tema mõju täiel määral ka käivitamisel, kui ankur alles seisab. Lisapooluste mõju kommuteerimisele rajaneb asjaolul, et kommuteeritava sektsiooni juhtmed ankru pöörlemisel liiguvad lisapooluste magnetväljas. Seepärast pole



Joon. 42-4. Transformatoorse emj. indutseerimise selgitamiseks



Joon. 42-5. Vektordiagramm ühefaasilise peavoolumootori lisapooluste toime selgitamiseks

põhimõtteliselt võimalik lisapooluste abil transformatoorse emj. mõju kompenseerimine kõigis töörežiimides, vaid seda saab teha ainult ankru ühe kindla pöörlemiskiiruse juures ja sedagi vaid lisaabinõude kasutamisel.

Asi seisab selles, et kommuteeritavas sektsioonis indutseeritud reaktiivsed elektromotoorsed jõud (enda- ja vastastikuse induktsiooni) ning ankrureaktsioonist tingitud elektromotoorsed jõud on võrdelised ankruvoolu hetkväärtustega ja on seega mootori vooluga ajaliselt faasis. Ka lisapooluste voog on vooluga faasis ning avaldab seepärast mainitud emj. suhtes kompenseerivat toimet. Kuid transformatoorne emj. on pooluste voost ja seega ka mootori voolust ajaliselt 90° võrra järel. Seepärast on transformatoorne emj. maksimaalne hetkel, kui mootori vool on null ning tavalisel viisil kujundatud lisapooluste süsteemi voog ja nende poolt kommuteeritavas sektsioonis indutseeritud emj. on antud hetkel seega samuti null. Tulemusena lisapoolused transformatoorse emj. suhtes mingit kompenseerivat toimet ei avalda.

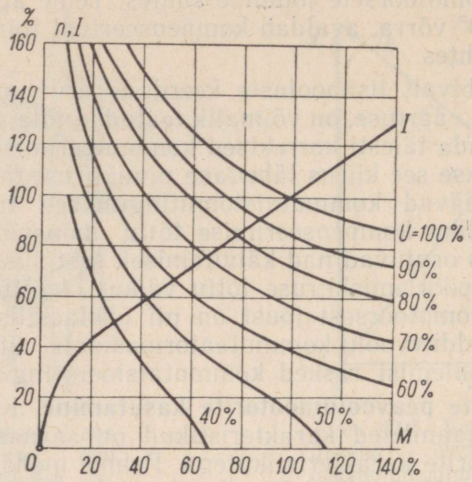
Olukorra parandamiseks šunteeritakse lisapooluste mähised aktiivtakistusega (joon. 42-1). Et lisapooluste mähise enda takistus vahelduvvoolu puhul on põhiliselt induktiivne, siis šunteerituna ei ole seda mähist läbiv vool I_L enam ajaliselt faasis mootori koguvooluga I (joon. 42-5), sest ta on nihutatud aktiivtakistust läbivast üldvoolu osast I_R 90° võrra. Lisapooluste mähise voolu I_L võime jaotada (joon. 42-5) kaheks komponendiks I_r ja I_t. Esimene nendest, olles faasis mootori koguvooluga I, avaldab kompenseerivat toimet kommuteeritavas sektsioonis indutseeritud reak-

tiivsete elektromotoorsete jõudude suhtes. Teine aga, olles voolust I nihutatud 90° võrra, avaldab kompenseerivat toimet transformatoorse emj. suhtes.

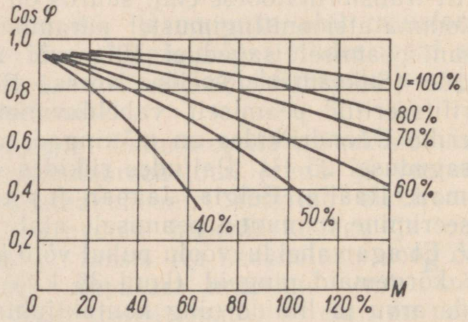
Valides sobivalt lisapooluste keerdude arvu ning šunteeriva aktiivtakistuse väärtuse, on võimalik teatud kindla pöörlemiskiiruse juures saavutada täiesti korrektsed kommuteerimistingimused. Tavaliselt valitakse see kiirus lähedane nimikiirusega. Teiste kiiruste juures aga jäävad kommutatsioonitingimused transformatoorse emj. mittetäieliku kompenseerimise tõttu mõnevõrra raskemaks. Eriti rasketeks osutuvad nad käivitamisel, sest siis on lisapooluste mõju väikese pöörlemiskiiruse tõttu väike. Tingituna transformatoorsest elektromotoorsest jõust on nii ühefaasilise peavoolu kui ka teiste vahelduvvoolu-kommutaatormasinate üheks põhiliseks puuduseks võrdlemisi rasked kommutatsioonitingimused.

Ühefaasiliste peavoolumootorite kasutamine. Kõne all olevate mootorite mehaanilised karakteristikud on sarnased alalisvoolu-peavoolumootorite karakteristikutega. Pehme mehaanilise karakteristiku tõttu on ühefaasilised peavoolumootorid sobivad transpordiseadmete jaoks ning neid kasutatakse eeskätt vahelduvvooluga elektrifitseeritud raudteedel. Mootorite nimivõimsused ulatuvad kuni 3000 kW. Et transformatoorse emj. suurus on võrdeline sagedusega, siis kommutatsioonitingimuste parandamiseks kasutatakse tänapäevani peamiselt sagedusi $16^2/_3$ või 25 Hz. Nii on mõningate riikide (Saksamaa, Šveits, Norra, Rootsi, Austria) raudteed elektrifitseeritud peamiselt vahelduvvooluga sagedusel $16^2/_3$ Hz; Ameerika Ühendriikides on mõningad raudteed elektrifitseeritud ka sagedusel 25 Hz. Paljudes riikides (NSVL, Inglismaa, Prantsusmaa, Itaalia, Belgia, Jaapan jt.) on senini raudteede elektrifitseerimine toimunud peamiselt alalisvooluga pingel 3000 või 1500 V. Et aga vahelduvvoolu puhul võib kontaktjuhtmestikus kasutada kõrgemaid pingeid (kuni 35 kV) ning seejuures saab alajaamade arvu ja liinide ning kontaktjuhtmete ristlõikeid vähendada, siis viimasel ajal on kõikjal tekkinud suur huvi raudteede elektrifitseerimise vastu vahelduvvooluga ja just 50 Hz sageduse juures. Standardse sageduse kasutamine võimaldab raudteid toita üldisest energiasüsteemist ja seega saavutada suurt kokkuhoidu. Seejuures kasutatakse veduritel kas alaldamisseadmeid koos alalisvoolu-peavoolumootoritega või ühefaasilisi peavoolumootoreid sagedusele 50 Hz. Ühefaasiliste peavoolumootorite töökindlust on viimastel aastatel suudetud parandada ning nende kasutamine osutub võimalikuks keskmise kaaluga rongide puhul.

Võimsaid ühefaasilisi peavoolumootoreid käivitatakse tavaliselt madaldatud pingel. Elektriveduritele paigutatud mootoreid toidetakse transformaatori sektsioneeritud sekundaarmähise kaudu, mille abil võib muuta mootori toitepinget ja ka tema karakteristikuid. Joonistel 42-6 ja 42-7 on toodud tüüpilise ühefaasilise



Joon. 42-6. Ühefaasilise peavoolumootori kiiruskarakteristikud



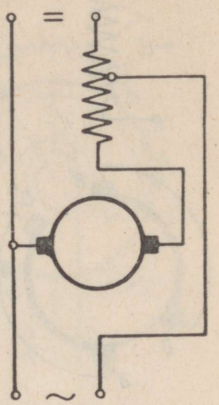
Joon. 42-7. Ühefaasilise peavoolumootori võimsusteguri kõverad

peavoolumootori kiiruse, voolu ja võimsusteguri sõltuvus koormusmomendist võllil mitmesuguste pingete puhul. Kõik suurused on esitatud protsentides nimiväärtustest.

Universaalne kommutaatormootor. On arusaadav, et ühefaasiline peavoolumootor on võimeline töötama ka toitmisel alalisvooluga. Lähtudes sellistest võimalustest ehitatakse väikese võimsusega (kuni mõnesaja vatini) peavoolumootorid sellistena, et neid võib lülitada nii vahelduv- kui ka alalisvooluvõrku. Seepärast nimetatakse neid mootoreid universaalseteks. Nad leiavad laialdast kasutamist majapidamis- ja muudes väiksemates seadmetes. Seejuures nendes mootorites kompensatsioonimähist ja lisapoolu-

seid ei kasutata. Kommuteerimistingimuste osaliseks parandamiseks võib harju geomeetrilisest neutraalvööst veidi välja nihutada.

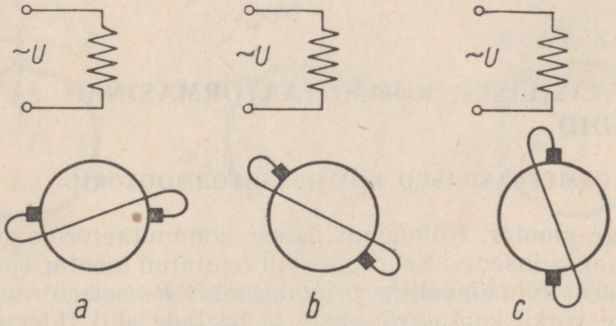
Toitmisel vahelduvvooluga avaldab tunduvat mõju mootori kogu induktiivtakistus, mille tulemusena sama pinge juures pöörlemiskiirus vahelduvvoolul jääb väiksemaks kui alalisvoolu puhul. Et kiirust tõsta, lülitatakse vahelduvvoolul töösse ainult osa ergutusmähisest (joon. 42-8). Universaalseid mootoreid käivitatakse üldreeglina otseselt võrku lülitamise teel.



Joon. 42-8. Universaalse kommutaatormootori skeem

42-2. REPULSIOONMOOTORID

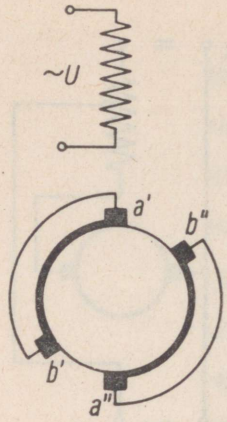
Repulsioonmootoriks nimetatakse ühefaasilist kommutaatormootorit, mille ankruahel harjadel lühistatakse, ergutusmähis aga lülitatakse võrku (joon. 42-9). Vool ankru mähises indutseeritakse ergutusvoo poolt. Harjade asend on reguleeritav. Joonisel 42-9, *a* esitatud harjade asendi puhul ankru mähises voolu ei indutseerita. See on harjade asend käivitamisel. Kui harjad sellest



Joon. 42-9. Repulsioonmootor erinevate harjade asenditega

asendist välja nihutada (joon. 42-9, *b*), indutseeritakse ankrus vool ja ta hakkab pöörlema. Pöörlemiskiirust on võimalik harjade asendi muutmisega reguleerida. Joonisel 46-9, *c* esitatud asend vastab lühise olukorrale, kus voolud kujunevad suureks, mootori poolt arendatav moment aga on null. Teatud kindla harjade asendi puhul on mootori karakteristikud sarnased ühefaasilise peavoolumootori karakteristikutega.

Repulsioonmootorit saab ehitada ka kahe harjade komplektiga, nagu on näidatud joonisel 42-10. Harjade *a'a''* asend on muutu-



Joon. 42-10. Kahekordse harjade komplektiga repulsioonmootor

matu, harjade $b'b''$ asendit aga saab reguleerida. Kui harjade a' ja b' ning vastavalt ka harjad a'' ja b'' on kohakuti, siis ankrus voolu ei ole ja pöördemoment on null. See vastab harjade asendile käivitamisel. Mootori töötamisel on ainult osa ankru mähisest koormatud vooluga (tugevad jooned joonisel 42-10).

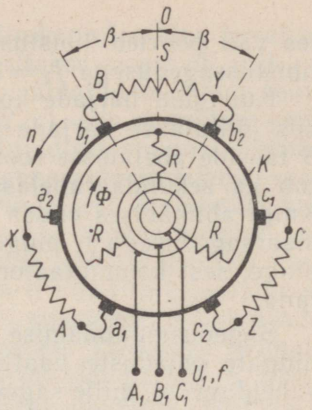
Repulsioonmootoreid on võimalik ehitada võimsustele kuni 3...5 kW. Tänapäeval kasutatakse neid üsna harva.

XLIII PEATÜKK

KOLMEFAASILISED KOMMUTAATORMASINAD JA MASINKASKAADID

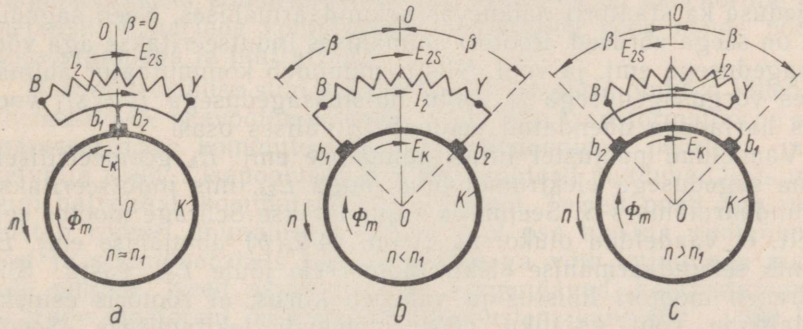
43-1. KOLMEFAASILISED KOMMUTAATORMOOTORID

Schrage mootor. Kolmefaasilistest kommutaatormootoritest on levinuim saksa inseneri Schrage poolt leiutatud mootor (joon. 43-1). Selle mootori kolmefaasiline primaarmähis R asetseb rootoril ning lülitatakse võrku kontaktrõngaste ja harjade abil (klemmid A, B, C joonisel 43-1). Sekundaarmähis S asetseb staatoril ning koosneb kolmest faasist, mis omavahel ei ole otseselt ühendatud. Staator on konstruktsiooni poolest sarnane tavalise asünkroonmootori staatoriga. Rootoril asetseb peamähisega R samades uuretes abimähis, mis sarnaneb alalisvoolumasina ankrumähisega ning on ühendatud kommutaatoriga. Joonisel 43-1 ei ole seda mähist näidatud, vaid jämeda ringjoonega on näidatud ainult kommutaator. Kommutaatorile on paigutatud kaks kolmefaasilist harjade komplekti, vastavalt a_1, b_1, c_1 ja a_2, b_2, c_2. Sekundaarmähise faasid on ühendatud harjadega vastavalt joonisele 43-1. Harjade komplektid on konstruktiivselt kujundatud nii, et neid on võimalik võrdlemisi suure nurga ulatuses samaaegselt pöörata. Seejuures harjade



Joon. 43-1. Schrage mootori skeem

komplektid kas lähenevad üksteisele või liiguvad üksteisest eemale. Harjade komplektid on omavahel masina telje sihis nihutatud ning neid võib kommutaatoril pöörata ka kohakuti ja isegi üksteisest mööda. Tuleb veel silmas pidada, et p pooluspaari puhul on tegelikult igas harjade komplektis $3p$ harjapolti ning p harjade gruppi on seejuures ühendatud paralleelselt.



Joon. 43-2. Schrage mootori kiiruse reguleerimise põhimõtte selgitamiseks

Kui harjade komplektid a_1, b_1, c_1 ja a_2, b_2, c_2 asetsevad harjadel kohakuti ning seega vastavad harjad, näiteks b_1 ja b_2, paiknevad samadel kommutaatori lestadel (joon. 43-2, a), siis sekundaarmähise faasid S on lühistatud. Seejuures pinge harjapaaride b_1, b_2 jne. vahel on null, rootori abimähises vool puudub ja mingit mõju masina töörežiimile ta ei avalda. Sellises olukorras töötab Schrage mootor tavalise asünkroonmootorina, mille toitmine toimub rootori kaudu. Kui sellises mootoris primaarne (rootori) magnetväli rootori suhtes pöörleb kellaosuti suunas kiirusega $n_1 = 60f_1/p$ (joon. 43-1, 43-2), siis rootor ise hakkab pöörlema vastupidises suunas kiirusega $n < n_1$, nii et sekundaarse (staatori) mähise suh-

tes väli pöörleb libistuskiirusega $n_1 - n$ ning indutseerib temas libistussagedusega $f_2 = sf_1$ voolusid.

Kui nüüd harjade komplektid lahku nihutada (joon. 43-2, *b*), siis lülitatakse harjade ja kommutaatori kaudu sekundaarmähise *S* faaside ahelatesse rootori abimähise vastavad osad. Seega lülitub ka sekundaarahelasse vastav abimähise pinge või emj. E_k. Kuigi abimähises endas pöörleva välja poolt indutseeritakse primaarsagedusega f_1 pinge, on harjadel libistussagedusega $f_2 = sf_1$ pinge, sest kommutaator koos harjadega töötab sagedusmuundajana.

Sagedusmuundamise põhimõte selgub alalisvoolumasina mõningate omaduste vaatlemisel. Viimase ankrus indutseeritakse vahelduvvool, mille sagedus on määratud ankru mähise pöörlemiskiirusega pooluste magnetvoo suhtes; harjadel, mis selle magnetvoo suhtes ei liigu, on aga voolu sagedus null, s. o. esineb alalisvool. Kui aga alalisvooluharjad panna pöörlema, siis nende polaarsus vaheldumisi muutub, s. t. harjadel on vahelduvpinge ja -vool. Viimaste sagedus on määratud harjade pöörlemiskiirusega pooluste voo suhtes. Schrage kommutaatormootori harjad seisavad paigal, kuid selle eest pöörleb nende suhtes mootori pöördväli ning selle pöörlemiskiirus määrab seega sageduse harjadel, kuid samuti sageduse ka staatoril paiknevas sekundaarmähises. Need sagedused on seega võrdsed. Rootori abimähises indutseeritakse aga võrgusagedusega emj. ja vool. Niisiis muundab kommutaator abimähises võrgusagedusega f_1 voolu libistussagedusega $f_2 = sf_1$ vooluks harjadega ühendatud vooluahela välises osas.

Vaadeldud põhjustel liitub abimähise emj. E_k geomeetriliselt sama sagedusega elektromotoorse jõuga E_{2s}, mis indutseeritakse sekundaarmähises *S*. Seejuures kujundatakse Schrage mootor selliselt, et vaadeldud olukorras (joon. 44-2, *b*) abimähise emj. E_k toimib sekundaarmähise elektromotoorsele jõule E_{2s} vastu. Siis suureneb mootori libistus ja väheneb kiirus, et rootoris esineks küllaldane vool vajaliku pöördemomendi tekitamiseks. Seega Schrage mootor põhimõtteliselt on rootori kaudu toidetav asünkroonmootor, mille sekundaarmähisesse juhitakse rootori abimähises indutseeritav emj. Äsjavaadeldud režiimis (joon. 43-2, *b*) on sekundaarvool I_2 suunatud abimähise elektromotoorsele jõule E_k vastu. Abimähis töötab seega tarbijarežiimis (võrdle olukorda alalisvoolumootoris võrgupinge, ankru vastu-elektromotoorse jõu ja ankru voolu suhtes). Järelikult on abimähise osa vaadeldavas režiimis analoogiline reostaadi osaga kontaktrõngastega asünkroonmootori sekundaarahelas. Mõlemad tarbivad sekundaarahelas libistusenergiat sP_{em}, suurendavad seetõttu libistust ja vähendavad kiirust. Vahe on ainult selles, et reostaadi puhul libistusenergia läheb kaduma, Schrage mootoris antakse aga see võimsus abimähisest *A* magnetvälja abil primaarmähisesse *R* tagasi. Tulemusena Schrage mootori kasutegur libistuse suurenemisel oluliselt

ei vähene, mis ongi tema põhiliseks eeliseks, võrreldes tavalise asünkroonmootoriga, mille kiirust reguleeritakse reostaadi abil.

Kui nihutada harjad joonisel 43-2, *a* näidatud asendist senivaadeldule vastupidises suunas (joon. 43-2, *c*), siis abimähise emj. E_k toimib sekundaarmähise S suhtes vastupidises suunas. Abimähis töötab nüüd sekundaarahela suhtes generaatorirežiimis, saades energiat magnetvälja kaudu primaarmähisest R. Rootori kiirus osutub sünkroonsest suuremaks ($n > n_1$), libistus muutub negatiivseks, sekundaarmähise emj. E_{2s} suund samuti muutub vastupidiseks ning see mähis töötab elektriliselt nüüd tarbijarežiimis.

Schrage mootori libistus oleneb emj. E_k suurusest, s. o. harjade b_1, b_2 jne. kaugusest üksteisest kommutaatoril. Tavaliselt võimaldab Schrage mootor kiiruse reguleerimist piirides 3 : 1, s. o. libistuste piirkonnas $-0{,}5 \leqslant s \leqslant 0{,}5$. Kui näiteks mootoril on $2p = 6$ ja $f_1 = 50$ Hz, siis sünkroonkiirus on $n_1 = 1000$ p/min, vähim kiirus $n_{min} = 500$ p/min ja suurem $n_{max} = 1500$ p/min. Mootori käivitamine toimub otsese võrku lülitamise teel, kusjuures harjad on vähimale kiirusele vastavas asendis.

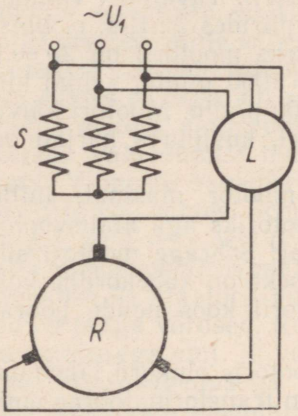
Konstruktsioonilt meenutab Schrage mootor masinat, mille staatoriks on asünkroonmasina staator, rootoriks aga alalisvoolumasina, õigemini üheankrumuundaja ankur. Schrage mootori silmapaistvaimaks konstruktiivseks iseärasuseks on kahekordne kolmefaasiline harjade komplekt kommutaatoril koos nende pööramise seadmega ja juhtrattaga.

Kommuteerimise suhtes on Schrage mootoris olukord lähedane ühefaasilisele peavoolumootorile, ainult siin transformatoorne emj. indutseeritakse kommuteeritavates sektsioonides pöörleva magnetvälja poolt. Lisapoolused Schrage mootoril puuduvad, mis muidugi halvendab kommutatsioonitingimusi. Teiselt poolt aga moodustab rootori abimähise võimsus vaid osa masina nimivõimsusest ja sekundaarahela koos abimähisega võib kujundada madalale pingele. Need asjaolud aga kergendavad kommutatsiooni. Schrage mootoreid on ehitatud võimsusteni kuni 400 ... 500 kW, tavaliselt aga on nende võimsused kuni 50 kW. Kommuteerimine toimub Schrage mootorites täiesti rahuldavalt, kuid keerukama konstruktsiooni ja mittemassilise tootmise tõttu on nende hind asünkroonmootori hinnast kuni kaks-kolm korda suurem.

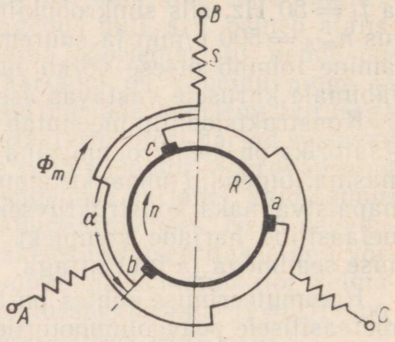
Schrage mootori kasutegur on mõnevõrra asünkroonmootori omast väiksem, seejuures aga võib tema võimsustegur olla märksa suurem ja mootor võib maksimaalse kiiruse läheduses isegi tarbida mahtuvuslikku voolu. Võimsusteguri parandamist saavutatakse harjade sobiva paigaldamisega staatori mähiste suhtes, mistõttu abimähise emj. E_k omab võimsustegurit parandavat komponenti. Mootori kiirus- ja mehaanilised karakteristikud on jäigad nagu asünkroonmootoritelgi.

Staatori kaudu toidetavad jäiga kiiruskarakteristikuga kommutaatormootorid. Nimetatud mootorid on oma tööpõhimõttelt sarna-

sed Schrage mootoriga, ainult nende toitmine toimub staatori kaudu. Staatori mähis *S* (joon. 43-3) sarnaneb asünkroonmootori omaga, rootori mähis aga alalisvoolumasina ankru mähisega. Kommutaatoril asetseb kolmefaasiline harjade komplekt, mille asend tavaliselt on kindel. Lisapinge lülitamine sekundaar- (rootori-) ahelasse toimub regulaatori *L* abil, mille primaarpool on samuti lülitatud võrku, sekundaarpool aga masina sekundaarahelasse. Lisapinge suurus, vajaduse korral aga ka tema faas, on reguleeritav. Regulaatorina *L* võib näiteks kasutada ühises kolmnurklülituses mähistega induktsioonregulaatorit.



Joon. 43-3. Staatori kaudu toidetava kommutaatormootori põhimõtteskeem



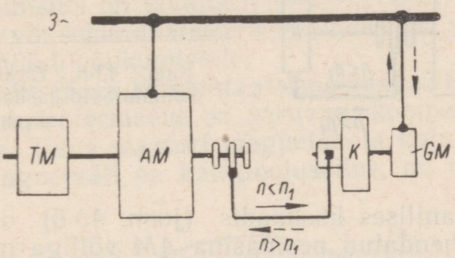
Joon. 43-4. Kolmefaasilise peavoolukommutaatormootori põhimõtteskeem

Kolmefaasiline peavoolumootor. Kui võrku lülitatav staatori mähis harjade ja kommutaatori abil ühendada järjestikku rootori mähisega, saamegi kolmefaasilise peavoolumootori (joon. 43-4), mille kiiruskarakteristik sarnaneb alalisvoolu-, samuti ühefaasilise peavoolumootori vastava karakteristikuga. Seejuures kiiruse üldine väärtus oleneb nurgast α teatava staatori faasi ja temaga ühendatud harja telgede vahel (vt. joon. 43-4). Kui nurk $\alpha = 0$, siis kujutab masin lihtsalt kolmefaasilist paispooli, staatori ja rootori magnetomotoorsete jõudude teljed ühtivad ja mingit pöördemomenti masin ei arenda. Tavalistes töörežiimides nurk $\alpha = 90 \ldots 150°$ piirides. Käivitamine toimub otsese võrku lülitamise teel, nurk α olles lähedane nullile. Edasiselt harjade pööramisega suurendatakse nurka α ja mootor hakkab tööle.

Kolmefaasilisi peavoolumootoreid kasutatakse tänapäeval harva, mille tõttu pole olulist vajadust tema töörežiimide lähemaks vaatlemiseks.

Kaskaadide tüübid. Eespool (p. 43-1, *a*) vaatlesime kolmefaasilist kommutaatormootorit, mille kiiruse reguleerimine toimub mootori abimähise abil. Suuremate võimsuste puhul ($P > 500$ kW) on sellist põhimõtet raske realiseerida, mistõttu abimähise funktsioonid antakse siis üle iseseisvale kommutaatormasinale, kommutaatormootori enda asemel aga võetakse kasutusele kontaktrõngastega asünkroonmootor. Seadet, mis koosneb kontaktrõngastega asünkroonmootorist (peamasin) ja tema kiiruse reguleerimise eesmärgil kasutatud vahelduvvoolu-kommutaatormasinast (abimasin), nimetatakse kommutaatorkaskaadiks. Esialgu tutvume kaskaadide põhitüüpidega.

Esineb kaks kommutaatorkaskaadi tüüpi: 1) *elektriline kaskaad* ja 2) *elektromehaaniline kaskaad.*

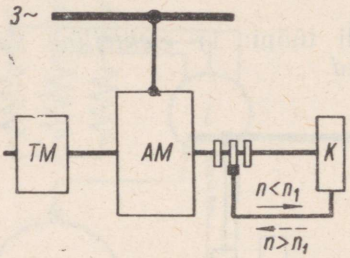


Joon. 43-5. Elektrilise kommutaatorkaskaadi põhimõtteskeem

Elektrilises kaskaadis (joon. 43-5) on abimasin *K* (kolmefaasiline kommutaatormasin) ühendatud peamasinaga *AM* (asünkroonmootor) selle kontaktrõngaste kaudu ainult elektriliselt. Peamasin *AM* veab tema võlliga ühendatud töömasinat *TM*, abimasinaga *K* aga on sidurdatud vahelduvvooluvõrku ühendatud asünkroon- või sünkroonmasin *GM*, mis võib töötada nii generaatorikui ka mootorirežiimis. Kommutaatormasinas *K* indutseeritav pinge on lülitatud asünkroonmootori *AM* sekundaarahelasse ning viimase kiiruse reguleerimine toimub kommutaatormasina pinge reguleerimise teel. Kui peamasina *AM* kiirus n on väiksem sünkroonsest ($n < n_1$), siis abimasin *K* töötab mootorirežiimis, saades energiat peamasina sekundaarahelast. Samal ajal masin *GM* töötab generaatorirežiimis ning annab peamasina libistusvõimsuse võrku tagasi (mitte arvestades kadusid masinas). Kui abimasinas *K* indutseeritav pinge on null, siis peamasin töötab normaalse asünkroonmootori töörežiimis mingi positiivse libistusega. Kui aga abimasinas *K* indutseeritava pinge faasi muudetakse 180° võrra, tõuseb peamasina kiirus n sünkroonsest n_1 suuremaks ($n > n_1$).

Seejuures masin *GM* töötab mootorina, tarbides võrgust võimsust, abimasin *K* töötab aga generaatorina ja toidab peamasina *AM* sekundaarahelat.

Kaskaadi koormus on piiratud peamasina *AM* vooluga. Kui see vool vastab nimivoolule, saamegi maksimaalsed lubatavad koormused. Elektrilise kaskaadi (joon. 43-5) puhul jääb siis konstantseks pöördemoment kaskaadi peamasina võllil, võimsus aga muutub võrdeliselt kiirusega. Seepärast nimetatakse elektrilist kaskaadi mõnikord ka *konstantse momendiga kaskaadiks,* kuigi tegelikult ta moment võib muutuda piirkonnas nullist kuni põhimasina *AM* nimimomendini.



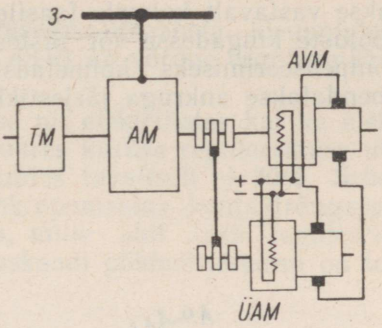
Joon. 43-6. Elektromehaanilise kommutaatorkaskaadi põhimõtteskeem

Elektromehaanilises kaskaadis (joon. 43-6) on abimasin *K* mehaaniliselt ühendatud peamasina *AM* võlliga ning elektriliselt tema sekundaarahelaga. Kaskaadi allasünkroonse ($n < n_1$) kiiruse puhul töötab abimasin mootorirežiimis, tarbides võimsust peamasina sekundaarahelast. Abimasin arendab seejuures mehaanilist võimsust, mis rakendub peamasina võllile ning viimase kaudu töömasinale. Kui kaskaadi pöörlemiskiirus on sünkroonsest suurem, töötab abimasin generaatorirežiimis, tarbides võllilt mehaanilist võimsust ning andes sellele vastavat elektrilist võimsust peamasina sekundaarahelasse. Kiiruse reguleerimine toimub samuti abimasinas indutseeritava pinge reguleerimise teel. Peamasina konstantse voolu korral arendab elektromehaaniline kaskaad konstantset võimsust, mistõttu teda mõnikord nimetatakse ka *konstantse võimsusega kaskaadiks*, kuigi tegelikult tema võimsus võib erinevatel kiirustel olla erinev, mis sõltub töömasina omadustest ja tema tööreżiimist.

On välja töötatud väga mitmesuguseid kaskaade, mis üksteisest erinevad põhiliselt abimasina tüübi poolest ning vastavalt sellele ka üldiste omaduste poolest. Allpool tutvume lähemalt ainult mõnede enamkasutatavate kaskaadidega.

Kaskaad üheankrumuundajaga. Kaskaadi skeem on toodud joonisel 43-7. Üheankrumuundaja *ÜAM* on teiste masinatega ühendatud ainult elektriliselt. Vahelduvvoolu poolel on ta ühendatud peamasina *AM* kontaktrõngastega, alalisvoolu poolel aga alalisvoolu-

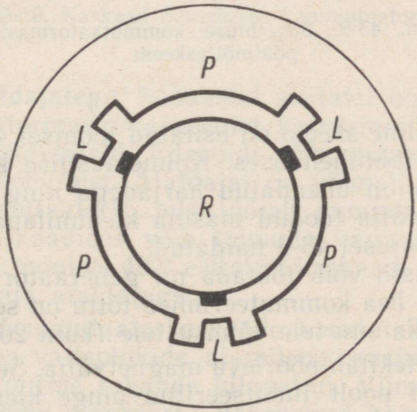
masinaga *AVM*, mis omakorda on ühendatud peamasina võlliga (elektromehaaniline kaskaad). Üheankrumuundaja ja alalisvoolumasin saavad ergutusvoolu mingist kõrvalisest alalisvooluallikast. Kiiruse reguleerimine toimub alalisvoolumasina ergutuse reguleerimise teel. Üheankrumuundaja ergutusvoolu reguleerimisega on võimalik mõjutada tema vahelduvvoolu reaktiivkomponenti ning seega ka peamasina võimsustegurit.



Joon. 43-7. Kaskaad üheankrumuundajaga

Kirjeldatud kaskaadi kasutatakse tavaliselt kiiruse reguleerimiseks ainult sünkroonsest väiksematel kiirustel. Minimaalne asünkroonmootori libistus on tavaliselt $s = 5 \ldots 6\%$, sest veel väiksemate libistuste või sekundaarsete sageduste $f_2 = sf_1$ puhul üheankrumuundaja kaldub võnkumistele.

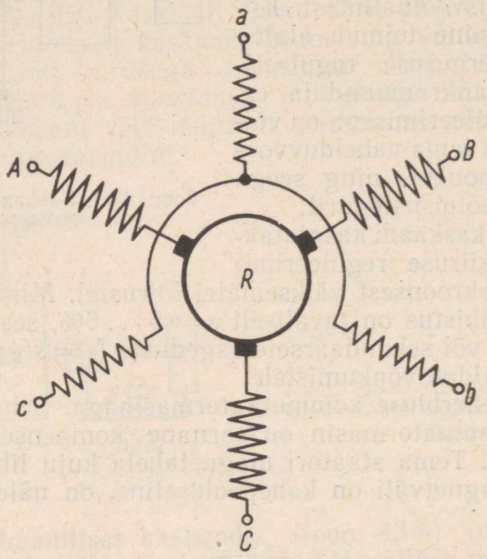
Kaskaad Scherbiuse kommutaatormasinaga. Scherbiuse vahelduvvoolu-kommutaatormasin on sarnane kompenseeritud alalisvoolumasinaga. Tema staatori magnetahela kuju lihtsamal juhul, kui pöörlev magnetväli on kahepooluseline, on näidatud joonisel



Joon. 43-8. Scherbiuse kommutaatormasina staatori magnetahela kuju

43-8. Staator omab kolme peapoolust *P*, millel on ergutusmähise poolid, vastavalt kolmele faasile. Kommuteerimise parandamise eesmärgil on ette nähtud kolm lisapoolust *L*. Ankur on samasugune nagu alalisvoolumasinal, ainult kommutaatorile paiguta-

takse vastavalt kolmele faasile ka kolm harjade komplekti. Peapooluste kingadesse või otstesse paigutatakse ankrureaktsiooni kompenseerimiseks kolmefaasiline kompensatsioonimähis, mis ühendatakse ankruga järjestikku.



Joon. 43-9. Scherbiuse kommutaatormasina põhimõtteskeem

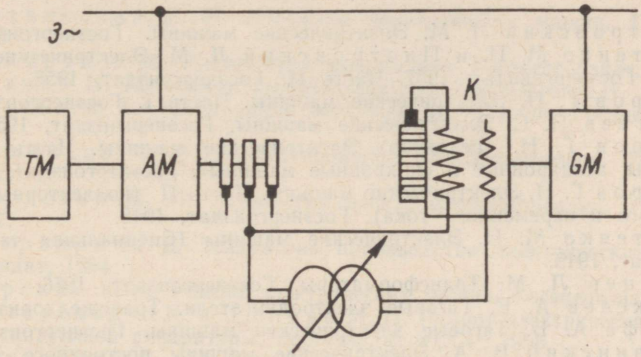
Masina elektriline skeem on esitatud joonisel 43-9. Ergutusmähis (*a, b, c*) on tähtühenduses. Kolmefaasilise kompensatsioonimähise kolm otsa on ühendatud harjadega ning ülejäänud kolm otsa *A, B, C* on välja toodud masina klemmilauale. Lisapooluste mähiseid ei ole joonisel 43-9 näidatud.

Scherbiuse masin võib töötada nii generaatorina kui ka mootorina. Suhteliselt hea kommuteerimise tõttu on selliseid masinaid võimalik ehitada ka suurtele võimsustele (kuni 2000 . . . 3000 kW).

Ergutusmähis tekitab pöörleva magnetvälja. Seisva rootori korral on ergutusvoo poolt indutseeritud pinge klemmidel *A, B, C* null, sest ankru- ja kompensatsioonimähises indutseeritud pinged on võrdsed ja vastassuunalised. See tuleneb asjaolust, et kompensatsioonimähise keerdude arv võrdub ankru mähise ekvivalentse faasi keerdude arvuga. Tavaliselt pöörleb ankur magnetvälja pöörlemissuunas ning pöörlemisolukorras tema mähises indutseeritud pinge väheneb, samal ajal kui kompensatsioonimähises indutseeritud pinge jääb sama ergutusvoo puhul endiseks. Vastavalt tekib masina välisklemmidel *A, B, C* pinge, mis konstantse ergutusvoo

puhul on võrdeline pöörlemiskiirusega. Peaahela klemmipinge sagedus (klemmidel *A, B, C* joon. 43-9) on võrdne ergutusmähise voolu sagedusega.

Scherbiuse masinat kasutatakse nii elektrilistes kui ka elektromehaanilistes kaskaadides, kusjuures kiiruse reguleerimise ulatus moodustab sünkroonkiiruse suhtes tavaliselt $\pm$ 30%. Scherbiuse masin ergutatakse pea-asünkroonmasina kontaktrõngastelt vastava reguleeritava trafo kaudu, mille abil saab reguleerida ergutusvoolu. Sellise elektrilise kaskaadi põhimõtteskeem on toodud joonisel 43-10.



Joon. 43-10. Kaskaad Scherbiuse kommutaatormasinaga

Kaskaad alaldajatega. Viimastel aastatel on hakatud kaskaadides kommutaatormasinate asemel kasutama ka alaldajaid ja nimelt elavhõbealaldajaid. Edaspidi võib oodata ka pooljuhtalaldajate kasutuselevõtmist. Alaldajat on võimalik vaadelda ka kui omapärast kommutaatorit, mis töötab muundajana. Alaldajate rakendamine kaskaadides võib toimuda väga mitmesugusel viisil. Näiteks võib joonisel 43-7 esitatud kaskaadi skeemis asendada üheankrumuundaja alaldajaga.

Kokkuvõte. Kommutaatorkaskaade kasutatakse peamiselt metallurgiatööstuses valtspinkide ajamitena, kusjuures nende võimsused ulatuvad mitme tuhande kilovatini. Viimasel ajal on kaskaadide kasutamine mõnevõrra vähenenud Leonardi agregaatide (vt. p. 9-2) ja ioonajamite (tüüritav elavhõbealaldaja-alalisvoolumootor) arvel. On aga võimalik, et seoses pooljuhtalaldajate tehnika arenguga kaskaadide osatähtsus jälle mõnevõrra tõuseb.

Eelnevas on kommutaatorkaskaadidest esitatud vaid lühike ülevaade. Kasutatakse veel teistsuguste kommutaatormasinatega ja skeemidega kaskaade. Kuid ka toodud kaskaadide skeemid olid mõnevõrra lihtsustatud. Nii puudusid nendes lisaseadmed käivitamise otstarbeks.

KASUTATUD JA SOOVITATAV KIRJANDUS

Пиотровский Л. М. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1960.

Костенко М. П. и Пиотровский Л. М. Электрические машины. Часть I. Госэнергоиздат, 1957. Часть II. Госэнергоиздат, 1958.

Петров Г. Н. Электрические машины. Часть I. Госэнергоиздат, 1956.

Сергеев П. С. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1955.

Петров Г. Н. (редактор) Электрические машины. Часть I (трансформаторы, асинхронные и синхронные машины). Госэнергоиздат, 1940.

Петров Г. Н. Электрические машины. Часть II (коллекторные машины постоянного и переменного тока). Госэнергоиздат, 1948.

Костенко М. П. Электрические машины (Специальная часть). Госэнергоиздат, 1949.

Шницер Л. М. Трансформаторы. Госэнергоиздат, 1956.

Алексеев А. Е. Тяговые электродвигатели. Трансжелдориздат, 1951.

Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины. Госэнергоиздат, 1957.

Толвинский В. А. Электрические машины постоянного тока. Госэнергоиздат, 1956.

Харитонов А. М. Многоскоростные электродвигатели. Госэнергоиздат, 1954.

Чечет Ю. С. Управляемый асинхронный двигатель с полым ротором. Госэнергоиздат, 1955.

Чечет Ю. С. Электрические микромашины автоматических устройств. Госэнергоиздат, 1957.

Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. Изд-во АН СССР, 1955.

Грузов Л. Н. Методы математического исследования электрических машин. Госюнергоиздат, 1953.

Мееров М. В. Основы автоматического регулирования электрических машин. Госэнергоиздат, 1952.

Лайбль Т. Теория синхронной машины при переходных процессах. Госэнергоиздат, 1957.

Ермолин Н. П. Переходные процессы в машинах постоянного тока. Госэнергоиздат, 1951.

Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. Госэнергоиздат, 1955.

Сыромятников И. А. Вопросы эксплуатации синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1948.

Комар Е. Г. Вопросы эксплуатации турбогенераторов. Госэнергоиздат, 1950.

Сыромятников И. А. Режимы работы синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 1952.

Машины электрические (сборник государственных стандартов). Стандартиздат, 1957.

Пиотровский Л. М. и Паль Е. А. Испытание электрических машин. Часть I. Госэнергоиздат, 1949.

Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. Госэнергоиздат, 1950.

Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. и Сергеев П. С. Проектирование электрических машин. Госэнергоиздат, 1956.

Постников И. М. Выбор оптимальных размеров в электрических машинах. Госэнергоиздат, 1952.

Постников И. М. Проектирование электрических машин. Гостехиздат УССР, 1952.

Комар Е. Г. Вопросы проектирования турбогенераторов. Госэнергоиздат, 1955.

Жерве Г. К. Расчет асинхронного двигателя при перемотке. Госэнергоиздат, 1956.

Зимин В. И. и др. Обмотки электрических машин. Госэнергоиздат, 1950.

Калитвянский В. И. Изоляция электрических машин. Госэнергоиздат, 1949.

Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, 1953.

Булгаков Н. И. Расчет трансформаторов. Госэнергоиздат, 1950.

Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. Госэнергоиздат, 1958.

Сапожников А. В. Конструирование трансформаторов. Госэнергоиздат, 1952.

Московский М. И. Технология электромашиностроения. Госэнергоиздат, 1947.

Виноградов Н. В. Технология производства электрических машин. Госэнергоиздат, 1954.

Коварский Е. М. Ремонт электрических машин. Госэнергоиздат, 1958.

Андриевский С. К. и Шапиро М. Н. Ремонт электрических машин и пускорегулирующей аппаратуры. Гостехиздат УССР, 1955.

Вешеневский С. Н. Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей. Госэнергоиздат, 1955.

Дренов П. В. Справочник по ремонту электрических машин. Гостехиздат УССР, 1958.

Важнов А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. Госэнергоиздат, 1960.

Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б., Несторова, Е. Д. Испытание электрических машин. Ч. II. Госэнергоиздат, 1960.

Нюрнберг В. Испытание электрических машин. Госэнергоиздат. 1959.

SISUKORD

Eessõna 3

Sissejuhatus

0-1. Elektromagnetiline väli 5
0-2. Elektromagnetilise induktsiooni seadus 15
0-3. Absoluutne praktiline ratsionaliseeritud MKSA ühikute süsteem 19
0-4. Elektriahel alalisvoolu puhul 21
0-5. Magnetahel 27
0-6. Vahelduvvool ja -pinge. Vektordiagramm 30
0-7. Vahelduvpinged ja -voolud järjestik- ja paralleelahelas. Takistused ja juhtivused. Võimsus 34
0-8. Sümboolne meetod 39
0-9. Kolmefaasiline ahel ja kolmefaasiline vool 44
0-10. Elektrimasinaehituses kasutatavate materjalide omadusi . . 50

Esimene osa

Alalisvoolumasinad

I peatükk. Alalisvoolumasinate töötamispõhimõte ja ehitus 58
1-1. Alalisvoolumasina töötamispõhimõte 58
1-2. Alalisvoolumasina ehituse põhielemendid 63

II peatükk. Magnetahel ja tema arvutamise alused 70
2-1. Alalisvoolumasina magnetväli 70
2-2. Magnetahela arvutamise alused 71
2-3. Puistevoog 72
2-4. Magnetahela osade magneetimisergutused 73
2-5. Masina magneetimiskõver 79

III peatükk. Alalisvoolumasinate ankrumähised 80
3-1. Alalisvoolumasina ankur ja selle mähis 80
3-2. Silindrilise ankru mähis 81
3-3. Liht-silmusmähis 83
3-4. Liht-lainemähis 89
3-5. Mitmekordne silmusmähis 93
3-6. Mitmekordne lainemähis 95
3-7. Mähiste sümmeetria tingimused 97
3-8. Ühtlustusühendused 99
3-9. Mähiste tegelik teostamine 104
3-10. Alalisvoolumasina ankru mähise elektromotoorne jõud . . . 105
3-11. Alalisvoolumasinate ankrumähiste kasutusalad 106

IV peatükk. Alalisvoolumasina ankrureaktsioon 106
4-1. Alalisvoolumasina magnetväli koormusel 106
4-2. Ankrureaktsiooni magneetimisergutus 108
4-3. Ankrureaktsiooni komponendid 110
4-4. Ankrureaktsiooni komponentide mõju alalisvoolumasina põhimagnetväljale 112
4-5. Alalisvoolumasina ankrureaktsiooni mõju pingete jaotusele kommutaatoril 113

V peatükk. Alalisvoolumasina kommuteerimine 115
5-1. Kommuteerimisprotsessi olemus 115
5-2. Kommuteerimist mõjutavad mitteelektrilised tegurid . . . 117
5-3. Kommuteerivas sektsioonis esinevad elektromotoorsed jõud 118
5-4. Kommuteerimisprotsessi võrrandid 121
5-5. Sirgjooneline kommuteerimine 122
5-6. Kõverjooneline kommuteerimine 124
5-7. Lisapoolused 127
5-8. Muud abinõud kommuteerimise parandamiseks 129
5-9. Kommuteerimise reguleerimine 131

VI peatükk. Energiakaod elektrimasinates 135
6-1. Energia muundumine elektrimasinates ja sellega seotud kaod 135
6-2. Vaseskadu 138
6-3. Kadu harjade üleminekukontaktides 138
6-4. Rauaskadu 139
6-5. Mehaaniline kadu 140
6-6. Lisakadu 141
6-7. Kasutegur 141

VII peatükk. Elektrimasinate soojenemine ja jahutamine 142
7-1. Elektrimasinate soojenemise ja jahutamise olemus . . . 142
7-2. Ühtlase tahke keha soojenemine 143
7-3. Elektrimasinate soojuse hajumise tingimused 146
7-4. Elektrimasinates kasutatavad isoleerained ja nendele lubatavad ületemperatuurid 148
7-5. Elektrimasinate soojenemine sõltuvalt töötamisviisist . . . 151
7-6. Elektrimasinate jahutamine ja ventileerimine 152

VIII peatükk. Alalisvoolumasin generaatorina 156
8-1. Alalisvoolugeneraatori iseloomustus 156
8-2. Alalisvoolugeneraatorite liigitus 159
8-3. Võõrergutusega generaator 161
8-4. Haruvoolugeneraator 167
8-5. Peavoolugeneraator 172
8-6. Segaergutusega generaator 173
8-7. Alalisvoolugeneraatorite paralleeltöö 175

IX peatükk. Alalisvoolumasin mootorina 179
9-1. Alalisvoolumootori iseloomustus 179
9-2. Haruvoolumootor 183
9-3. Peavoolumootor 188
9-4. Kompaundmootor 191
9-5. Pöörlemiskiiruse reguleerimine 192
9-6. Alalisvoolumootor pidurina 196

X peatükk. Erituüpi alalisvoolumasinad 198
10-1. Unipolaarmasin 198
10-2. Põikväljageneraator 199
10-3. Elektrimasin-võimendaja 201
10-4. Keevitusgeneraatorid 203
10-5. Kolme ergutusmähisega generaator 205

Teine osa

Transformaatorid

XI peatükk. Transformaatorite töötamispõhimõte ja ehitus 207
11-1. Põhimõisted 207
11-2. Transformaatori töötamispõhimõte 208
11-3. Transformaatori ehitus 211
XII peatükk. Ühefaasilised transformaatorid, aseskeem, vektordiagramm, pingemuutus 216
12-1. Transformaatori tühijooks 216
12-2. Transformaatori koormus 221
12-3. Transformaatori aseskeem 225
12-4. Transformaatori lühis 227
12-5. Transformaatori parameetrite määramine 229
12-6. Transformaatori pingemuutus 233
12-7. Transformaatori kaod ja kasutegur 236
XIII peatükk. Kolmefaasilised transformaatorid 238
13-1. Kolmefaasilise voolu transformeerimine 238
13-2. Kolmefaasiliste transformaatorite mähiste ühendamine . . 240
13-3. Kolmefaasilise transformaatori tühijooks 244
XIV peatükk. Transformaatorite paralleeltöö 248
14-1. Transformaatorite paralleeltöö mõiste 248
14-2. Transformaatorite paralleeltöö tingimused 248
14-3. Energiakaod transformaatorite paralleeltööl 252
XV peatükk. Erituüpi jõutransformaatorid 253
15-1. Mitme mähisega transformaator 253
15-2. Autotransformaator 256
15-3. Reguleerimistransformaatorid 259
XVI peatükk. Kolmefaasiliste transformaatorite ebasümmeetriline koormus 263
16-1. Ebasümmeetrilise koormuse iseloomustus 263
16-2. Ebasümmeetriline koormus väljatoomata nulljuhtmega transformaatoril 264
16-3. Ebasümmeetriline koormus väljatoodud nulljuhtmega transformaatoril 264
XVII peatükk. Siirdenähtused transformaatoris 269
17-1. Transformaatori sisselülitamine 269
17-2. Transformaatori järsk lühis 272
17-3. Liigpingetest tingitud siirdenähtused transformaatoris . . 274
XVIII peatükk. Eriotstarbelised transformaatorid 277
18-1. Keevitustransformaatorid 277
18-2. Mõõtetransformaatorid 278
18-3. Transformaatorid faaside arvu muutmiseks 280
18-4. Transformaatorid sageduse muundamiseks 281
18-5. Transformaatorid vahelduvvoolu alaldamisskeemides . . . 282
XIX peatükk. Transformaatorite soojenemine ja jahutamine 284
19-1. Transformaatori soojenemine 284
19-2. Transformaatori jahutamine 286
19-3. Transformaatorite armatuur 289

Kolmas osa

Vahelduvvoolumasinate teooria üldküsimusi

XX peatükk. Vahelduvvoolumasinate põhitüübid, nende töötamispõhimõte ja ehitus 293
20-1. Vahelduvvoolumasinate põhitüübid 293
20-2. Asünkroonmasinate töötamispõhimõte ja ehitus 293

20-3. Asünkroonmasinate konstruktsioon 300
20-4. Sünkroonmasinate töötamispõhimõte ja ehitus 304
20-5. Sünkroonmasinate konstruktsioon 310
XXI peatükk. Vahelduvvoolumähiste elektromotoorne jõud 314
21-1. Vahelduvvoolumähiste koostamise põhimõtteid 314
21-2. Vahelduvvoolumasinate õhupilu magnetväli ja selle harmoonilised 315
21-3. Juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud 317
21-4. Uurde elektromotoorsete jõudude täht 318
21-5. Keeru, pooli, pooligrupi ja mähise faasi elektromotoorsed jõud 319
21-6. Elektromotoorse jõu kõvera kõrgemad harmoonilised ja nende vähendamise vahendid 323
XXII peatükk. Vahelduvvoolumähiste tüübid ja omadused 325
22-1. Üldisi andmeid 325
22-2. Vahelduvvoolumähiste põhielemente 326
22-3. Mähiste isolatsioon 330
22-4. Kolmefaasilised kahekihilised mähised täisarvulise uurete arvuga pooluse ja faasi kohta 333
22-5. Kolmefaasilised ühekihilised mähised täisarvulise uurete arvuga pooluse ja faasi kohta 338
22-6. Murdmähised 343
XXIII peatükk. Vahelduvvoolumähiste magnetomotoorne jõud 344
23-1. Staatori mähise magnetomotoorne jõud ja selle poolt tekitatud magnetväli 344
23-2. Täissammuga pooli magnetomotoorne jõud 346
23-3. Jaotatud mitmefaasilise mähise ühe faasi magnetomotoorne jõud 349
23-4. Kolmefaasilise mähise magnetomotoorne jõud 350
23-5. Magnetomotoorse jõu kõvera graafilise ehitamise viisid . . 352
XXIV peatükk. Vahelduvvoolumähiste induktiivtakistused 355
24-1. Põhimõisteid 355
24-2. Õhupilu magnetvälja poolt tekitatud induktiivtakistused . . 356
24-3. Puiste-induktiivtakistused 357

Neljas osa

Asünkroonmasinad

XXV peatükk. Asünkroonmasina tööprotsess, aseskeem, vektordiagrammid, karakteristikud 361
25-1. Asünkroonmasina tööprotsess 361
25-2. Pöörleva asünkroonmasina taandamine seisvale 363
25-3. Rootori ahela taandamine staatori ahelale 365
25-4. Asünkroonmasina aseskeem 367
25-5. Asünkroonmasina vektordiagramm 369
25-6. Energia bilanss 372
25-7. Asünkroonmasina karakteristikud 376
XXVI peatükk. Asünkroonmasina pöördemoment 381
26-1. Pöördemomendi üldine avaldis 381
26-2. Pöördemomendi sõltuvus libistusest 362
26-3. Suhtelise pöördemomendi avaldis. Klossi valem 386
26-4. Kõrgemate väljaharmooniliste mõju asünkroonmasina pöördemomendi kõverale 386
XXVII peatükk. Asünkroonmasina ringdiagramm 390
27-1. Asünkroonmasina ringdiagrammi koostamine 390
27-2. Asünkroonmasina põhisuuruste määramine ringdiagrammist 395
27-3. Asünkroonmasina ringdiagrammi koostamine katseandmete põhjal 398

XXVIII peatükk. Asünkroonmootori käivitamine. Sügav- ja kaksikuuretega mootorid 402
28-1. Asünkroonmootori käivitamisprotsessi üldisi küsimusi . . . 402
28-2. Asünkroonmootori käivitamise dünaamikast 405
28-3. Faasirootoriga asünkroonmootori käivitamine 406
28-4. Lühisrootoriga asünkroonmootori käivitamine otsese võrku lülitamisega 408
28-5. Lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitamine klemmipinge alandamisega 409
28-6. Sügavuurdelise lühisrootoriga asünkroonmootor 412
28-7. Kaksikuuretega lühisrootoriga asünkroonmootor 415
28-8. Sügavuuretega ja kaksikuuretega asünkroonmootorite võrdlus 419
XXIX peatükk. Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine. Pidurdamine . . 422
29-1. Asünkroonmootori kiiruse reguleerimise viisid 422
29-2. Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine primaarpinge muutmisega 422
29-3. Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine rootori ahela aktiivtakistuse muutmisega 424
29-4. Kiiruse reguleerimine pooluspaaride arvu muutmisega . . 425
29-5. Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine toitevõrgu sageduse muutmisega 429
29-6. Kaarstaatoriga asünkroonmootor 431
29-7. Asünkroonmootori pidurdamise režiimid 432
29-8. Pidurdamine energia andmisega võrku. Generaatorirežiim . . 432
29-9. Pidurdamine vastulülitusega 434
29-10. Dünaamiline pidurdamine 435
XXX peatükk. Asünkroonmootori töö ebanormaalsetes tingimustes . 437
30-1. Asünkroonmootori ebanormaalsed töörežiimid 437
30-2. Asünkroonmootori töötamine nimipingest erineval pingel . . 437
30-3. Asünkroonmootori töötamine erinevatel sagedustel püsiva primaarpinge juures 438
30-4. Asünkroonmootori töötamine ebasümmeetrilise primaarpingega 439
30-5. Asünkroonmootori töötamine ebasümmeetrilise rootoriahela korral 442
XXXI peatükk. Eritüüpi asünkroonmootorid 445
31-1. Käivitusmähistega ühefaasilised asünkroonmootorid . . . 445
31-2. Ühefaasilised kondensaatormootorid 447
31-3. Ühefaasilised mootorid lühiskeerdudega poolustel 450
31-4. Sagedusmuundajad 452
31-5. Induktsioonregulaatorid 453
31-6. Kahepoolse toitega masinad 455
31-7. Elektromagnetilised libistussidurid 457
31-8. Automaatikas kasutatavad asünkroon-mikromasinad . . . 459

Viies osa

Sünkroonmasinad

XXXII peatükk. Sünkroonmasina ankrureaktsioon 472
32-1. Sünkroonmasina ankrureaktsiooni füüsikaline olemus . . . 472
32-2. Ankrureaktsiooni elektromotoorsed jõud ja induktiivtakistused 475
32-3. Ankrureaktsiooni magnetomotoorse jõu ja ankru voolu taandamine ergutusmähisele 481
XXXIII peatükk. Sünkroongeneraatori vektordiagrammid ja karakteristikud sümmeetrilisel koormusel 488
33-1. Sünkroongeneraatori vektordiagrammid 488

33-2. Tühijooksukarakteristik 493
33-3. Lühisekarakteristiku lühisesuhe 494
33-4. Väliskarakteristik 499
33-5. Reguleerimiskarakteristik 500
33-6. Koormuskarakteristik 501
33-7. Ergutusvoolu ja pingemuutuse määramine vektordiagrammide abil 503
XXXIV peatükk. Sünkroongeneraatorite ebasümmeetrilised töörežiimid . 506
34-1. Ebasümmeetriliste režiimide iseloomustus ja uurimismeetod . 506
34-2. Sümmeetriliste voolukomponentide toime ja nendele vastavad elektrilised takistused sünkroonmasinates 509
34-3. Sünkroongeneraatorite töötamistingimused ebasümmeetrilisel koormusel 519
34-4. Ebasümmeetrilised lühised 522
34-5. Ühefaasiline sünkroongeneraator 529
XXXV peatükk. Sünkroonmasina järsk lühis 530
35-1. Sünkroonmasinate siirdeprotsesside üldine iseloomustus ja uurimismeetodid 530
35-2. Kolmefaasiline järsk lühis ülijuhtivate ahelate puhul . . . 533
35-3. Järsk lühis reaalses masinas 539
35-4. Lühisvoolude toime 546
XXXVI peatükk. Sünkroongeneraatorite paralleeltöö 550
36-1. Sünkroongeneraatorite lülitamine paralleeltööle 550
36-2. Sünkroonmasina paralleeltöö sünkroonsed režiimid 557
36-3. Sünkroonmasinate võimsus-nurk-karakteristikud 564
36-4. Sünkroonmasina sünkroniseeriv võimsus ja moment ning staatiline ülekoormatavus 573
36-5. Sünkroonmasina töötamine konstantse võimsuse ja muutuva ergutuse puhul 577
XXXVII peatükk. Sünkroonmasinate asünkroonsed režiimid 579
37-1. Sünkroongeneraatorite asünkroonsed töörežiimid 579
37-2. Asünkroonses režiimis töötava sünkroonmasina sünkroniseerimine 583
XXXVIII peatükk. Sünkroonmootorid ja -kompensaatorid 586
38-1. Sünkroonmootorite käivitamine 586
38-2. Sünkroonmootorite omadused 591
38-3. Sünkroonkompensaatorid 594
XXXIX peatükk. Sünkroonmasinate võnkumine 597
39-1. Sünkroonmasinate võnkumiste füüsikaline olemus . . . 597
39-2. Sünkroonmasinate dünaamiline stabiilsus 603
XL peatükk. Sünkroonmasina ergutussüsteemid ja ergutuse reguleerimine 605
40-1. Sünkroonmasinate ergutussüsteemid 605
40-2. Sünkroonmasinate ergutuse reguleerimine 611
XLI peatükk. Eritüüpi sünkroonmasinad 616
41-1. Sünkroonmasinad — muundajad 616
41-2. Eritüüpi sünkroonmootorid 620

Kuues osa

Vahelduvvoolu-kommutaatormasinad

XLII peatükk. Ühefaasilised kommutaatormootorid 623
42-1. Ühefaasiline peavoolumootor 623
42-2. Repulsioonmootorid 629
XLIII peatükk. Kolmefaasilised kommutaatormasinad ja masinkaskaadid 630
43-1. Kolmefaasilised kommutaatormootorid 630
43-2. Kommutaatorkaskaadid 635
Kasutatud ja soovitatav kirjandus 640

Янес, Ханс Йоханнесович,
Каазик, Пауль Юлиусович,
Пуусепп, Эуген Арнольдович,
Вольдек, Александер Иванович
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

На эстонском языке
Оформление В. Томассова

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

*

Toimetaja L. Abo
Kunstiline toimetaja R. Tungla
Tehniline toimetaja I. Vahtre
Korrektorid M. Pedajas ja V. Pillau

Ladumisele antud 2. XI 1960. Trükkimisele antud 3. VI 1961. Paber 60 × 90, 1/16. Trükipoognaid 40,5. Arvutuspoognaid 38,37. Trükiarv 7000. MB-03568. Tellimise nr. 10276. Hans Heidemanni nimeline trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. II.

Hind rbl. 1.54

3—5

A
23933

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00971103 9